

ISSN 2412-8627

Vol. 2 No. 1

Special Issue

Noise

Theory and Practice

Scientific Journal



I
2016

Acoustic Design Institute

Noise Theory and Practice

Scientific Journal
Vol. 2 No. 1
Special Issue

The founder - LLC 'Acoustic Design Institute'
in cooperation with Baltic State Technical
University 'VOENMEH' named after
D. F. Ustinov

Editor-in-chief

Nickolay Ivanov, Professor
Doctor of Engineering Science
St. Petersburg, Russian Federation

Deputy Editor-in-Chief

Gennadiy Kurzev, Professor
Ph.D. of Engineering Science
St. Petersburg, Russian Federation

Members of the Editorial Board

Lyudmila Drozdova, Professor
Ph.D. of Engineering Science

Igor Zapletnikov, Professor
Doctor of Engineering Science
Donetsk, Ukraine

Ilya Tsukernikov, Professor
Doctor of Engineering Science
Moscow, Russian Federation

Sergio Luzzi, Professor
Florence, Italy

Vladimir Tupov, Professor
Doctor of Engineering Science
Moscow, Russian Federation

Andrey Vasilyev, Professor
Doctor of Engineering Science
Samara, Russian Federation

Alexander Tyurin, Professor
Doctor of Engineering Science
Izhevsk, Russian Federation

Natalya Tyurina
Doctor of Engineering Science
St. Petersburg, Russian Federation

Aleksandr Shashurin, Assist. Professor
Ph.D. of Engineering Science
St. Petersburg, Russian Federation

Location address of the Editorial office

3/5 1st Krasnoarmeyskaya street
St. Petersburg, Russian Federation
Phone 8 (812) 495-77-97
www.noisetp.com
e-mail: noise.science@gmail.com

Executive Secretary

Boyko Julia

Journal is registered in Federal service
for supervision of communications,
information technology, and
mass media

The certificate of registration
ЭЛ № ФС 77-61637

Contents

Schelokov Y. RUS
Universal formula of calculation of sound insulation
of single-layer barriers
p. 2-7

Schelokov Y. RUS
Graphic-analytical method of calculation of sound
insulation of wall-cavity-panel systems
p. 8-16

Bratclavskii A., Kuklin D., Matveev P. RUS
Calculation of sound level in the reference
point from a moving train
p. 17-23

Kuklin D., Matveev P. RUS
Calculation models of railway vehicles noise
p. 24-33

Vasilev A., Lee-Ko-ShinYu, Sinikova V. RUS
Assessment of the levels of acoustic pollution on the
territory of sports base
стр. 34-40

Универсальная формула расчета звукоизоляции однослойных преград

Щелоков Ю.А.

Генеральный директор, ООО «Акустические расчеты»,
РФ, г. Санкт-Петербург, пр. Пискаревский д.25

Аннотация

Однослойные конструкции являются наиболее часто применимым типом конструкции в строительстве и технике. В данной статье рассматривается аналитический метод расчета звукоизоляции однородных конструкций, разработанный на основе классической теории Кремера. Проведена оценка применимости метода, на основе результатов расчета графоаналитическим методом Свода Правил СП 23-103-2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий».

Ключевые слова: звукоизоляция, строительная акустика, коэффициент механических потерь, фактор переизлучения, защита от шума.

Universal formula of calculation of sound insulation of single-layer barriers

Schelokov Y.

General Director, LLC "Acoustic calculations", Saint-Petersburg, Russia

Abstract

Single-layer designs are the most often applicable type of a design in construction and engineering. In this article the universal analytical method of calculation of sound insulation of designs developed on the basis of the classical theory of Kremer is considered. The assessment of applicability of a method, on the basis of results of calculation by a graphic-analytical method of the Set of rules of the joint venture 23-103-2003 "Design of sound insulation of the protecting designs of residential and public buildings" is carried out.

Keywords: sound insulation, building acoustics, mechanical loss factor, factor of re-radiation, noise protection.

1. Классическая теория расчета звукоизоляции тонких пластин

Звукоизоляция ограждающей конструкции R может быть определена на основе известного коэффициента прохождения звука $\tau(\theta)$:

$$R = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{\tau(\theta)} \right), \text{ [дБ]} \quad (1)$$

В реальных условиях звуковое поле, падающее на ограждающую конструкцию можно считать диффузным. Коэффициент прохождения для диффузного поля [1] определяется как

$$\tau_{diff} = \frac{\int_0^{78^\circ} \tau(\theta) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta}{\int_0^{78^\circ} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta}. \quad (2)$$

Для коэффициента прохождения звука через бесконечную тонкую пластинку в 1942 г. Кремером [2] была предложена формула

$$\tau(\theta) = \frac{1}{\left| 1 + \frac{Z(\theta) \cdot \cos(\theta)}{2\rho_0 c_0} \right|^2}, \quad (3)$$

где $Z(\theta)$ – импеданс безграничной пластины для вынужденных изгибных колебаний, [кг/м²с];

θ – угол падения, [рад];

ρ_0 – плотность воздуха, [кг/м³];

c_0 – скорость звука в воздухе, [м/с].

Выражение для расчета импеданса бесконечной тонкой пластины [3] имеет вид

$$Z(\theta) = i \left[\omega m - \frac{D(1+i\eta)\omega^3 \sin^4(\theta)}{c_0^4} \right], \quad (4)$$

где $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица;

$\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, [рад/с];

f – частота, [Гц];

m – поверхностная масса пластины, [кг/м²];

$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ – цилиндрическая жесткость пластины, [Па·м³];

E – модуль Юнга, [Па];

h – толщина пластины, [м];

μ – коэффициент Пуассона;

η – коэффициент механических потерь;

θ, c_0 – то же, что в формуле (3).

Характерной особенностью кривой звукоизоляции тонких конструкций является наличие эффекта волнового совпадения, который проявляется в уменьшении звукоизоляции на определенной частоте $f_0 = \frac{c_0}{1.8 \cdot c_{np} h}$ [Гц], где c_{np} – скорость продольных волн в материале преграды, [м/с].

Расчеты по формулам (1) - (4) хорошо согласуются для тонких конструкций (гипсокартонные листы, оконное стекло и др.) с графоаналитическим методом Свода Правил СП 23-103-2003 [4].

Суть графоаналитического метода определения звукоизоляции заключается в построении кривой звукоизоляции, имеющей на определенных участках линейную зависимость с конкретным углом наклона (см. рис.1).



Рис. 1. Характерный вид кривой звукоизоляции тонких преград

2. Корректировка классической теории звукоизоляции

Применение классической теории расчета звукоизоляции, как было сказано выше, возможно только для тонких конструкций. Условие применимости [5] классической теории можно выразить соотношением:

$$\lambda_{np} \geq 10h, \text{ [м]} \quad (5)$$

где λ_{np} – длина продольной волны в материале [м],

h – то же, что в формуле (4).

Распространение звука через более толстые конструкции (из тяжелого, легкого бетона, кирпичной кладки и т.п.) сопровождается возникновением не только изгибных, но и продольных сдвиговых колебаний.

В результате, частотные характеристики звукоизоляции массивных и тонкостенных конструкций ведут себя по-разному:

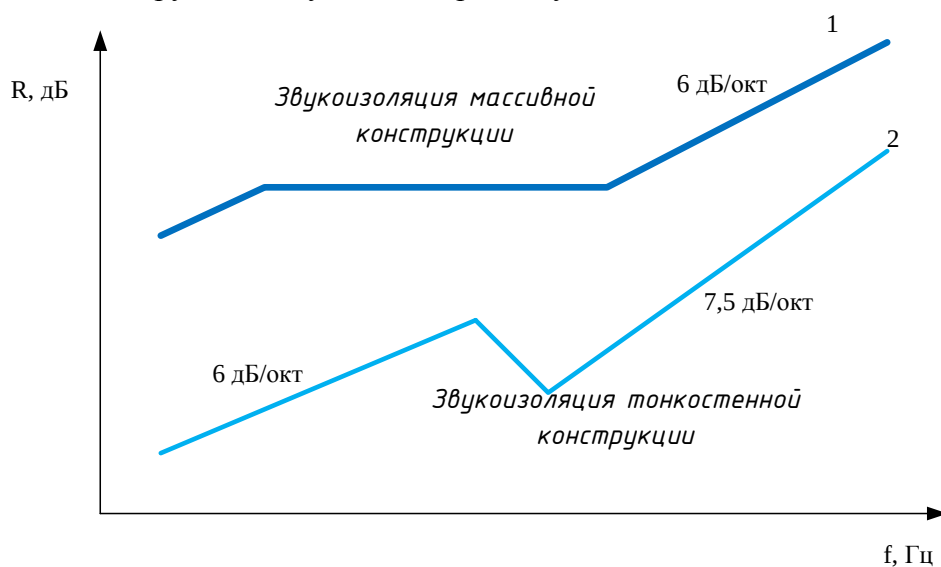


Рис. 2. Типичный вид кривых звукоизоляции «тонкой» и «толстой» конструкций

Для толстостенных конструкций частотная характеристика имеет ровное «плато», на котором звукоизоляция остается постоянной. Начиная с некоторой частоты, рост звукоизоляции составляет 6 дБ/окт.

Для тонкостенных конструкций частотная характеристика имеет подъем 6 дБ/окт, потом на частоте волнового совпадения, наблюдается провал звукоизоляции, после чего звукоизоляция растет линейно со скоростью 7,5 дБ/окт.

В настоящей работе предлагается аналитическая модель расчета звукоизоляции, учитывающая особенность распространения звука через преграду, в зависимости от ее толщины.

Импеданс толстостенной конструкции $Z'(\theta)$ определяется по формуле:

$$Z'(\theta) = \Phi(\theta) \cdot Z(\theta) = k_d \cdot \tan(\theta) \cdot Z(\theta) = \frac{2,5 \cdot d}{1000 \cdot c_0} \cdot \tan(\theta) \cdot Z(\theta), \quad (6)$$

где $\Phi(\theta)$ – фактор переизлучения k_d – коэффициент учитывающий толщину конструкции.

Для расчета звукоизоляции толстостенной (массивной) конструкции необходимо в формуле (3) вместо импеданса бесконечной пластины $Z(\theta)$ вставить импеданс толстостенной конструкции $Z'(\theta)$.

Формулы (1)-(6) позволяют определить звукоизоляцию однородной конструкции в более широком диапазоне толщин, нежели по модели расчета [6].

На рис. 2-3 представлены кривые звукоизоляции для кирпичной и газобетонной стен, различной толщины.

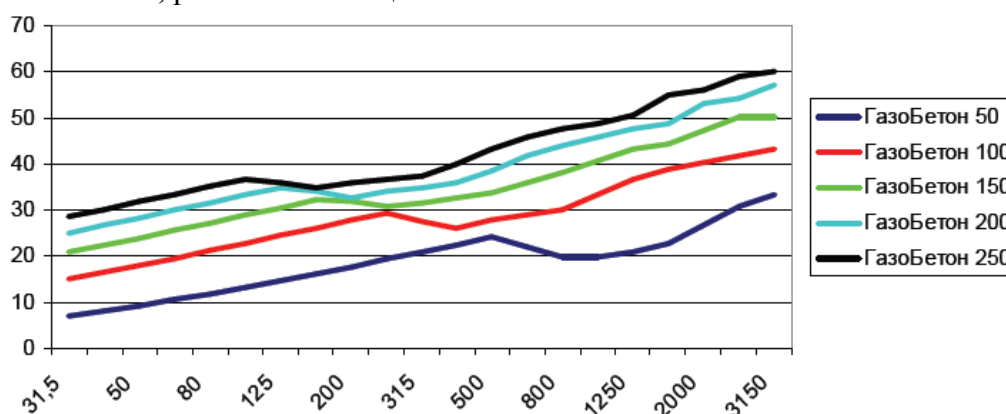


Рис. 3. Семейство расчетных кривых звукоизоляции для газобетонных стен с толщинами от 50 мм до 250 мм

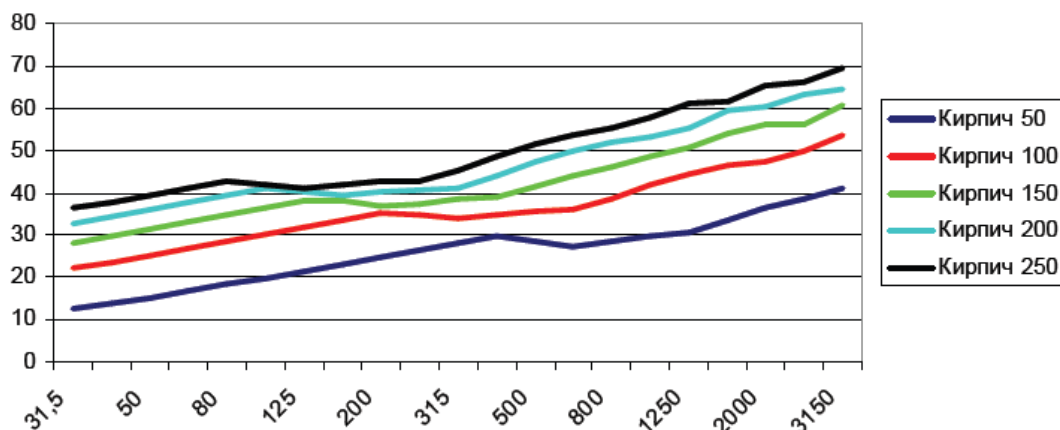


Рис. 4. Семейство расчетных кривых звукоизоляции для кирпичных стен с толщинами от 50 мм до 250 мм.

Анализ рисунков 3 и 4 показывает, что при увеличении толщины и массы конструкции, кривая звукоизоляции лежит выше, область «плато» проявляется сильнее и размещается в более низкочастотной области. При малых толщинах и массе, кривая звукоизоляции толстостенных конструкций вырождается в кривую звукоизоляции тонкостенных конструкций, с характерным падением звукоизоляции на частоте волнового совпадения.

На рисунке 5 представлены графики звукоизоляции, полученные по формулам (1)-(6) и по графоаналитическому методу для кирпичной стены, толщиной 250 мм.

На рисунке 6 представлены графики звукоизоляции, полученные по формулам (1)-(6) и по графоаналитическому методу для газобетонной стены, толщиной 250 мм.

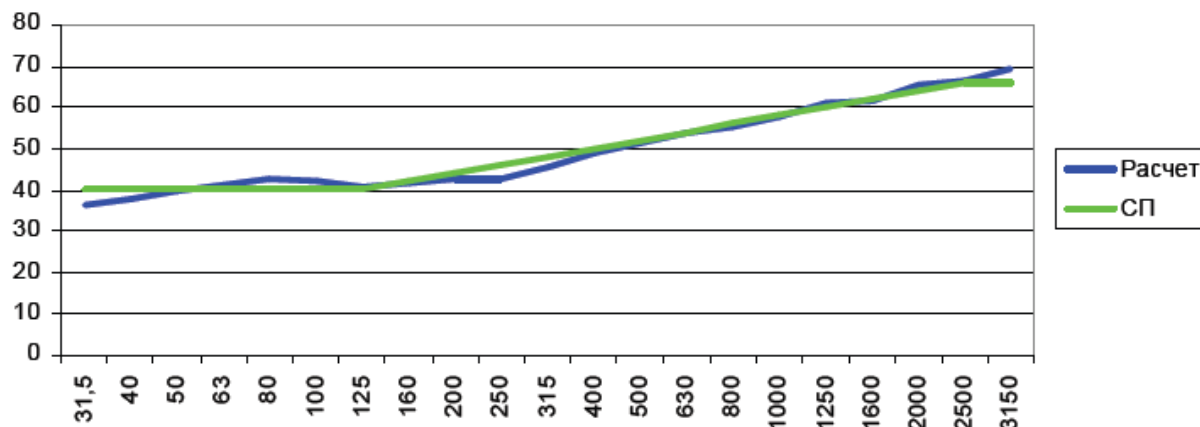


Рис. 5. Частотные зависимости звукоизоляции кирпичной стены, толщиной 250 мм

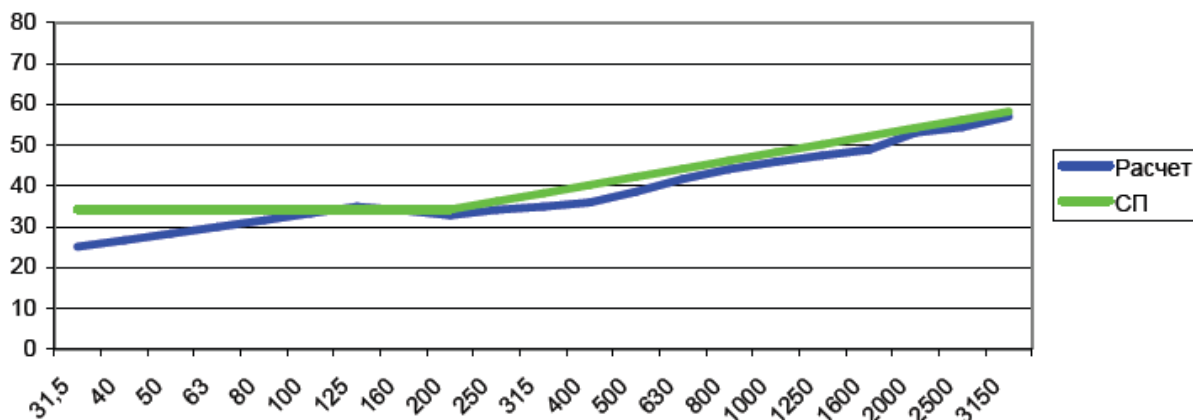


Рис. 6. Частотные зависимости звукоизоляции газобетонной стены, толщиной 250 мм

Из рисунков 5 и 6 видно, что расчетные кривые по универсальной методике хорошо согласуются с результатами расчета по графоаналитическому методу свода Правил СП 23-103-2003. При расчете по формулам (1) - (6) мы получаем дополнительную информацию о значении звукоизоляции на частотах ниже 100 Гц.

Заключение

Применение фактора переизлучения $\Phi(\theta)$, зависящего от тангенса угла падения звуковой волны на преграду, позволило рассчитать импеданс толстостенной ограждающей конструкции $Z'(\theta)$.

Подстановка полученного значения $Z'(\theta)$ в классическую теорию расчета

звукоизоляции, привела к возможности расчета звукоизоляции однослойных ограждений по единой методике, независимо от толщины ограждения, плотности и упругих характеристик материала.

Сравнение частотных характеристик звукоизоляции аналитическим и графическим методами, показало хорошую согласованность результатов расчета.

Список литературы

1. Marshall Long. Architectural Acoustics. 2nd Edition //M. Long, 2014. – 950 p.
2. Cremer L. Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall / L. Cremer // Akustische Zeitschrift, 1942. – №.7. – S. 81-125.
3. Боголепов, И.И. Архитектурная акустика / И.И. Боголепов. – СПб: Политехника, 2001. - 158 с.
4. СП 23-103-2003. Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий. – Москва, 2004.
5. Щевьев Ю.П., Осташевский Е.Н. Средства акустической обработки помещений. – СПб, 2010. – 328 с.
6. Щелоков Ю.А. Расчет звукоизоляции акустически однородных конструкций / Ю.А. Щелоков // Сборник докладов V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации»; Под ред. Н.И. Иванова. – Санкт-Петербург, 2015. – с.349-354.

Графоаналитический метод расчета звукоизоляции стен с гибкой плитой на отnose

Щелоков Ю.А.

Генеральный директор, ООО «Акустические расчеты»,
РФ, г. Санкт-Петербург, пр. Пискаревский д.25

Аннотация

В качестве дополнительной звукоизоляции однослойных толстостенных преград чаще всего применяют тонкие гибкие плиты на отnose – зашивки. В данной работе рассматривается графоаналитический метод расчета звукоизоляции конструкций с гибкой плитой на отnose, полученный обобщением данных протоколов испытаний в звукомерных камерах.

Ключевые слова: звукоизоляция, зашивка, гибкая плита на отnose, графоаналитический метод.

Graphic-analytical method of calculation of sound insulation of wall-cavity-panel systems

Schelokov Y.

General Director, LLC "Acoustic calculations", Saint-Petersburg, Russia

Abstract

As additional sound insulation of single-layer thick-walled barriers most often apply thin flexible plates. In this paper we consider graphic-analytical method of calculation of sound insulation structures with flexible plate and cavity. The method of calculation is obtained by analyzing the data of measurement protocols in reverberation chambers.

Keywords: sound insulation, wall-cavity-panel systems, graphic-analytical method.

Введение

Прогнозирование звукоизоляционной способности конструкций является неотъемлемой частью проектирования жилых, промышленных и коммерческих объектов.

Точный расчет звукоизоляции даже простых конструкций связан со множеством трудностей. Поэтому наибольшее применение при расчетах звукоизоляции получили полуэмпирические методы, основанные на построении частотных характеристик звукоизоляции в виде ломанной кривой. В зависимости от вида конструкции, вид ломанной кривой сильно меняется.

С точки зрения защиты от шума в акустике все строительные конструкции можно подразделить на типы:

1. Однослойные конструкции

1.1 Однослойные тонкостенные конструкции (стекло, стальные листы, гипсокартонные листы и др.).

1.2 Однослойные толстостенные конструкции (ж/б плита, кирпичная стена и др.).

2. Многослойные конструкции

2.1 Многослойные тонкостенные конструкции (двухкамерный стеклопакет, ГКЛ перегородка и др.).

2.2 Многослойные толстостенные конструкции.

2.3 Многослойные конструкции смешанного типа.

При этом наряду с однослойными конструкциями и многослойными тонкостенными конструкциями в строительстве все чаще применяют многослойные конструкции смешанного типа (см. рис. 1).

Как правило, применение подобных конструкций осуществляется уже после сдачи объекта в эксплуатацию. Причиной этому является недостаточная эффективность звукоизоляции однослойной толстостенной конструкции (например, пазогребневой межкомнатной стенки).

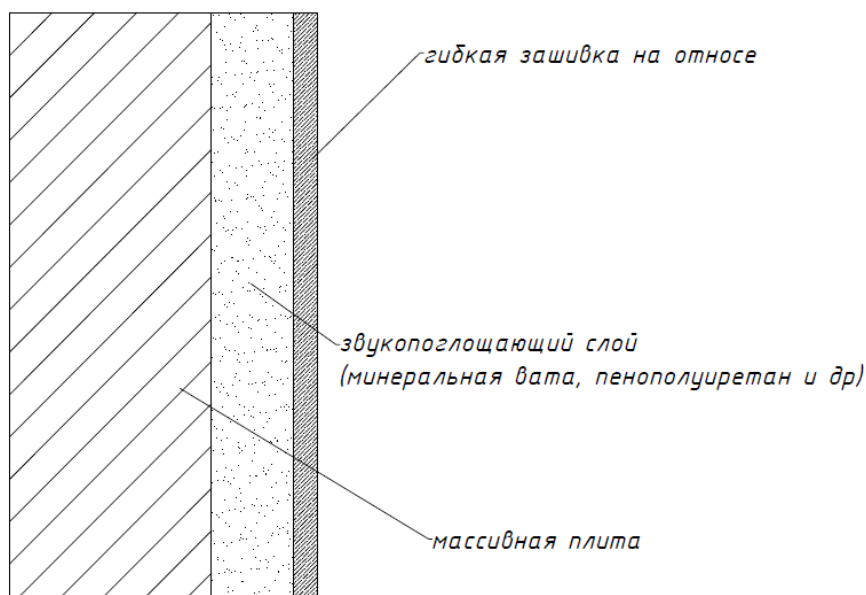


Рис. 1. Многослойная конструкция смешанного типа

Действительно, установка гибкой плиты на некотором расстоянии, от основной стены (потолка), позволяет увеличивать звукоизоляцию более эффективно, чем при монтаже гибкой плиты без отnose.

В существующей технической литературе большое внимание уделено расчету звукоизоляции однослойных конструкций и многослойных тонкостенных конструкций. Для них разработаны графические методики расчета, как например, в Своде Правил СП 23-103-2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий».

Для многослойных конструкций смешанного типа методов расчета звукоизоляции не много [1-3], которые касаются, как правило, расчета звукоизоляции перекрытия с устройством пола.

Графоаналитический метод расчета звукоизоляции массивной стены с гибкой плитой на отnose

Анализ результатов расчета звукоизоляции стен с гибкой плитой на отnose показал, что современные методики расчета звукоизоляции таких конструкций не обеспечивают требуемой точности.

В данной работе проведены исследования 19 протоколов измерений от различных лабораторий для 30 конструкций массивных стен с листовыми материалами на отnose.

Состав исследуемых конструкций представлен в Табл. 1.

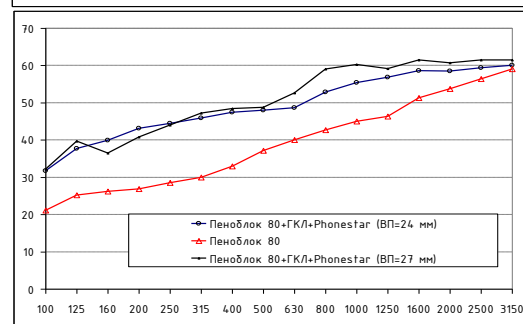
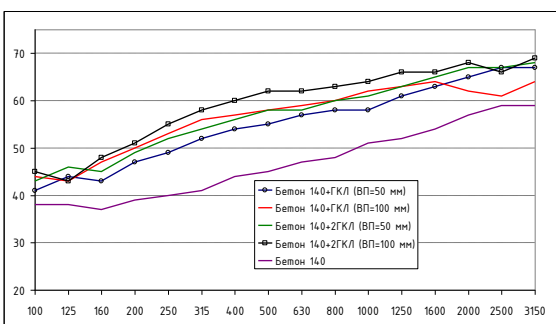
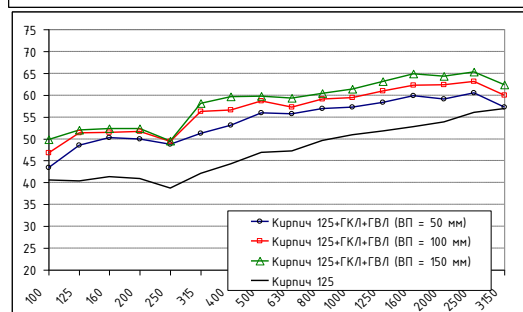
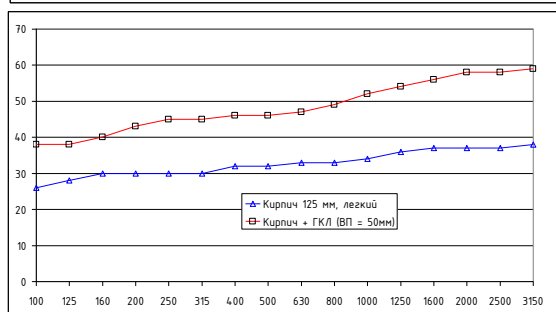
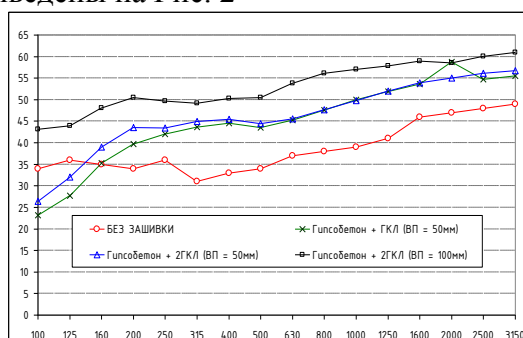
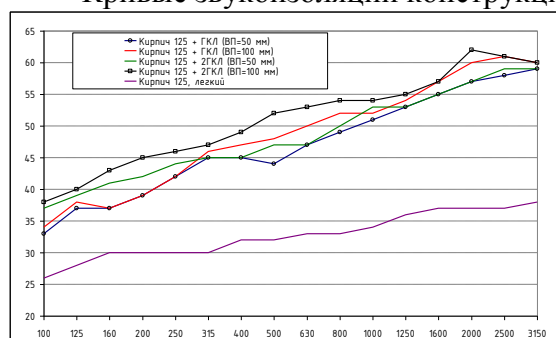
Таблица 1

Состав исследуемых конструкций

Материал стены	Толщина стены, мм	Материал зашивки	Толщина зашивки, мм	Воздушный промежуток, мм*
Гипсобетон	80	ГКЛ	12,5; 25	50, 100
Кирпич (легкий, тяжелый)	125	ГКЛ, ГВЛ	12,5; 25	50, 100, 150
Керамические блоки	140	ГКЛ, ГСП	12,5; 25	20, 50
Ж/б	140, 180	ГКЛ, PhoneStar	12,5; 25	24, 50, 100
Пенобетон	180	ГКЛ, PhoneStar	24,5	24, 27

* - воздушный промежуток заполнен минеральной ватой на основе базальта или стекловаты.

Кривые звукоизоляции конструкций приведены на Рис. 2



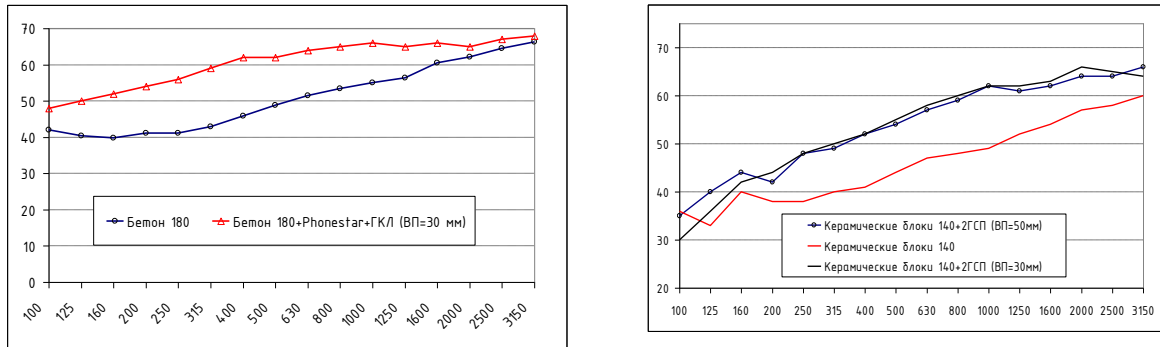


Рис. 2. Кривые звукоизоляции конструкций на основе данных протоколов измерений

Протоколы измерений были получены в лабораториях различных организаций:

- 1) НИИСФ РАСН;
- 2) ОАО «ЦТСС»;
- 3) ООО «ПКТИ».

Анализ полученных кривых показал ряд особенностей:

- независимо от состава конструкции наличие максимума звукоизоляции на частоте $f_M = 315$ Гц;
- на частоте f_B стены [2], прирост звукоизоляции Δ за счет применения плиты на отnose составляет $\Delta = 20 \cdot \log(\Delta m) - 12$,
где Δm – прирост массы, [кг/м²], за счет применения зашивки.
- наклон кривой звукоизоляции от точки М, составляет 2 дБ/тр. Октаву;
- после достижения значения 55 дБ, наклон кривой составляет 1 дБ/тр. октаву;
- в точке С, значение звукоизоляции практически перестает меняться и составляет в среднем 65 дБ;
- на частоте $f_N = 2,5 f_p$, прирост звукоизоляции составляет 5 дБ;
- между точками $f_N = 2,5 f_p$ и f_B , проводится прямая линия.

Частота резонанса конструкции f_p при заполнении воздушного промежутка минеральной ватой определяется по формуле $f_p = \frac{43}{\sqrt{m'd}}$ [Гц],

где m' – масса зашивки, [кг/м²]; d – толщина воздушного промежутка, [мм].

Частота резонанса конструкции f_p при незаполненном воздушном промежутке определяется по формуле $f_p = \frac{60}{\sqrt{m'd}}$, [Гц].

На основании изложенных данных в качестве графоаналитического построения звукоизоляции стен с плитой на отnose, может выступать кривая $NB'MTC$:

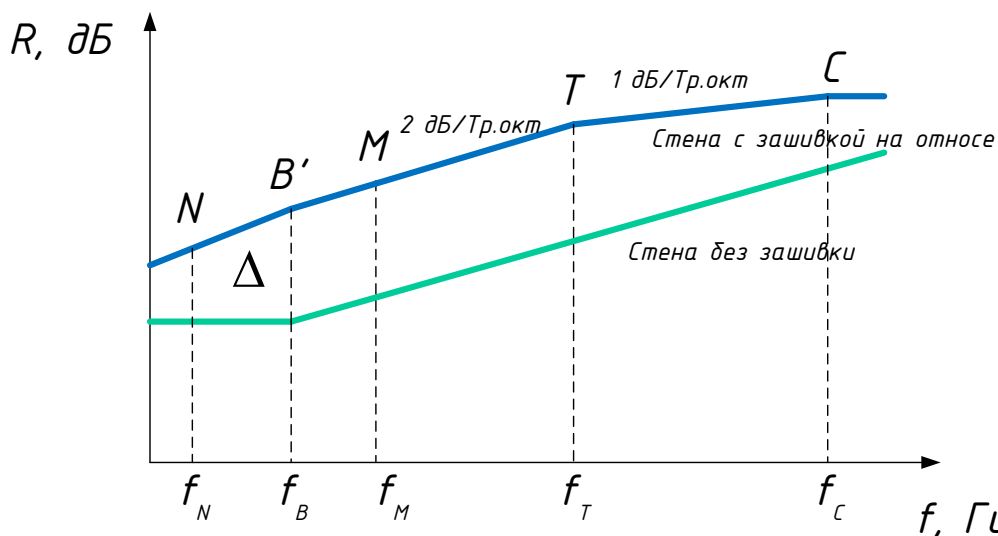


Рис. 3. Частотная характеристика звукоизоляции стены с плитой на отnose при $f_B < f_M$

Значения звукоизоляции на характерных частотах определяются из выражений:

- 1) $R_{B'} = R_B + \Delta$;
- 2) $R_N = R_B + 5$;
- 3) $R_T = 55$; $R_C = 65$.

Предлагаемая кривая Рис. 3 справедлива для случая $f_B < f_M$.

В случае, когда $f_B \geq f_M$, поведение кривой звукоизоляции меняется от точки f_B слева:

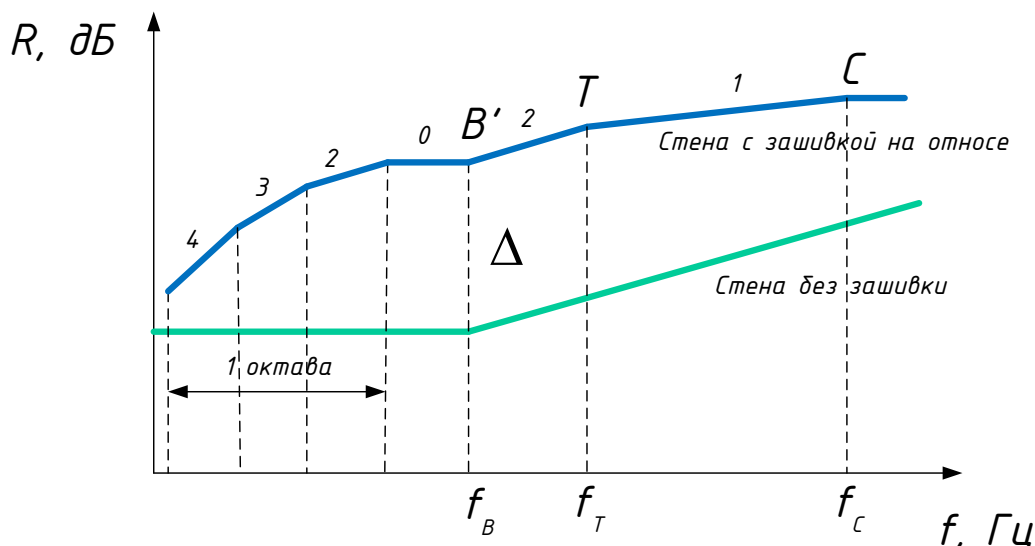


Рис. 4. Частотная характеристика звукоизоляции стены с плитой на отnose при $f_B \geq f_M$

При добавлении к зашивке 2-го слоя, звукоизоляция в точке B' , дополнительно увеличится на величину Δ' , таким образом, что звукоизоляция в точке B' будет равна

$$R_{B'} = R_B + \Delta + \Delta' = R_B + \Delta + 10 \cdot \log\left(\frac{2n}{n+1}\right), \quad (1)$$

где $n = \frac{m_{общ}}{m_1}$, $m_{общ}$ – суммарная масса (поверхностная плотность) обшивки, [кг/м²], m_1 – масса (поверхностная плотность) первого слоя обшивки, [кг/м²].

Кривые Рис. 3 и Рис. 4, справедливы при толщине воздушного промежутка $d = 50$ мм.

При увеличении этого расстояния вдвое ($d = 100$ мм), звукоизоляция в точке В' будет равна

$$R_{B'} = R_B + \Delta + \Delta' = R_B + \Delta + 10 \cdot \log\left(\frac{2n}{n+1}\right) + 2, \quad (2)$$

При увеличении толщины откоса до $d = 150$ мм, звукоизоляция в точке В' будет равна

$$R_{B'} = R_B + \Delta + \Delta' = R_B + \Delta + 10 \cdot \log\left(\frac{2n}{n+1}\right) + 4. \quad (3)$$

Из выражений (2) и (3) видно, что увеличение расстояния откоса на каждые 50 мм, приводит к приращению звукоизоляции в точке В' на 2 дБ.

Большой разброс значений в области резонансной частоты, говорит о том, что величина звукоизоляции на этой частоте сильно зависит от способа крепления зашивки. Именно в этой частотной области проявляется основное различие в эффективности звукоизоляции при применении металлических и деревянных каркасов, методов креплений, наличия виброизоляционных подкладок и др.

Ниже представлены примеры расчета звукоизоляции стен с плитой на откосе графоаналитическим методом:

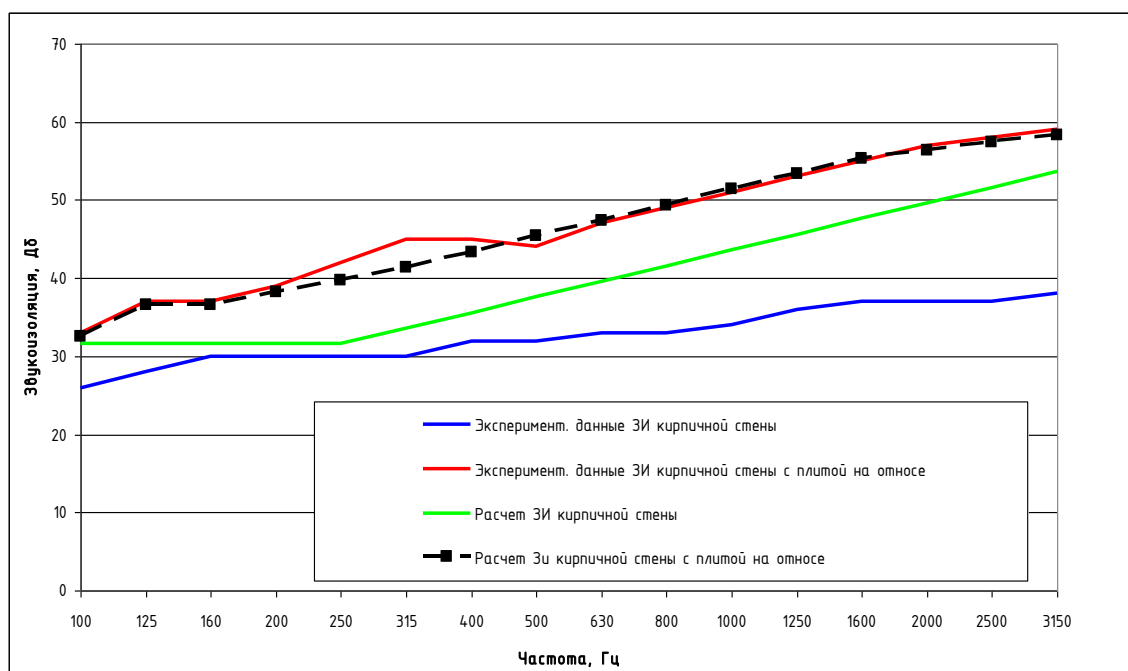


Рис. 5. Пример расчета звукоизоляции стенки из легкого кирпича, толщиной 125 мм, с обшивкой на откосе 50 мм, из листа ГКЛ

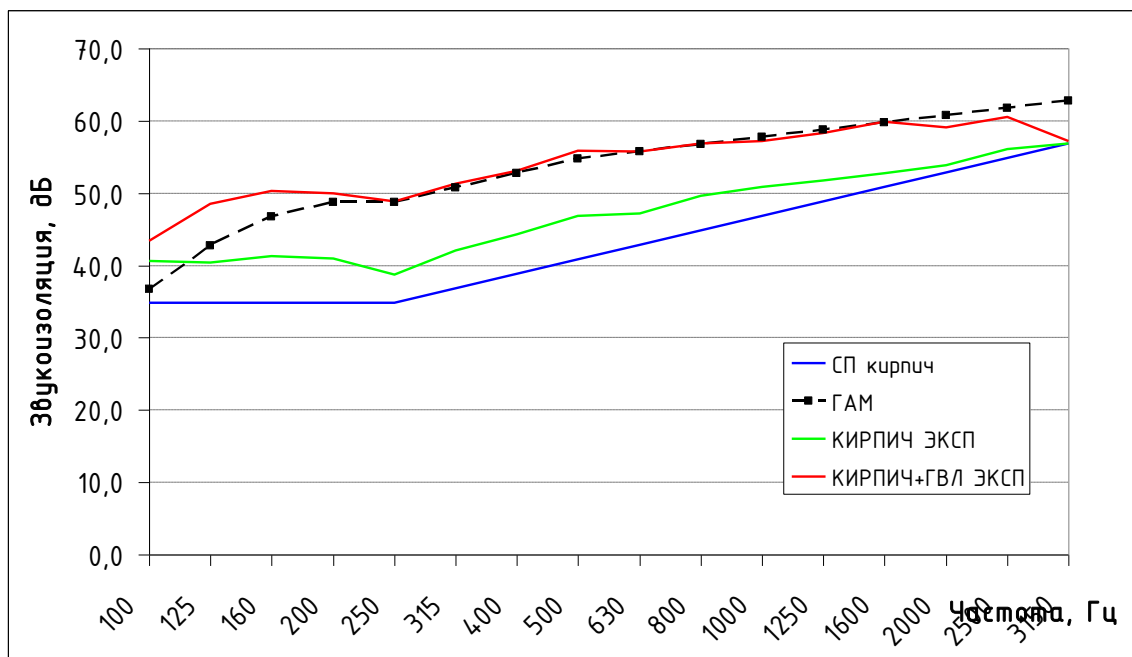


Рис. 6. Пример расчета звукоизоляции стенки из нормального кирпича, толщиной 125 мм, с обшивкой на отnose 50 мм, из листов ГВЛ и ГКЛ.

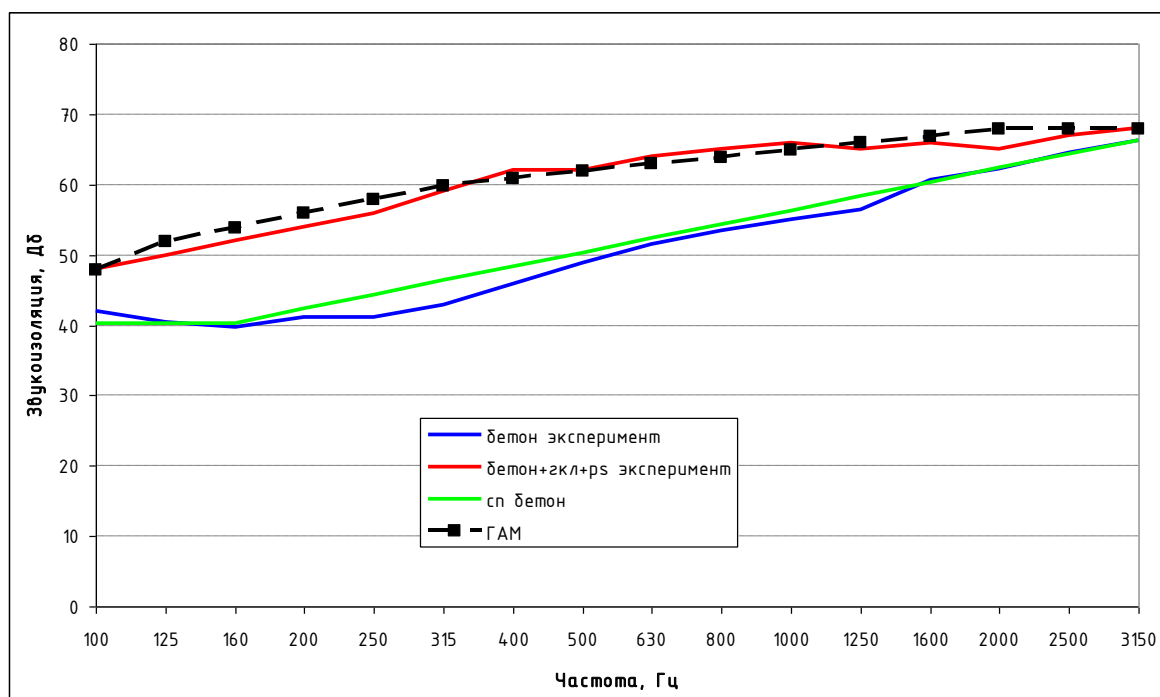


Рис. 7. Пример расчета звукоизоляции стенки из бетона, толщиной 180 мм, с обшивкой на отnose 27 мм, из листов ГКЛ и звукоизоляционной панели PhoneStar

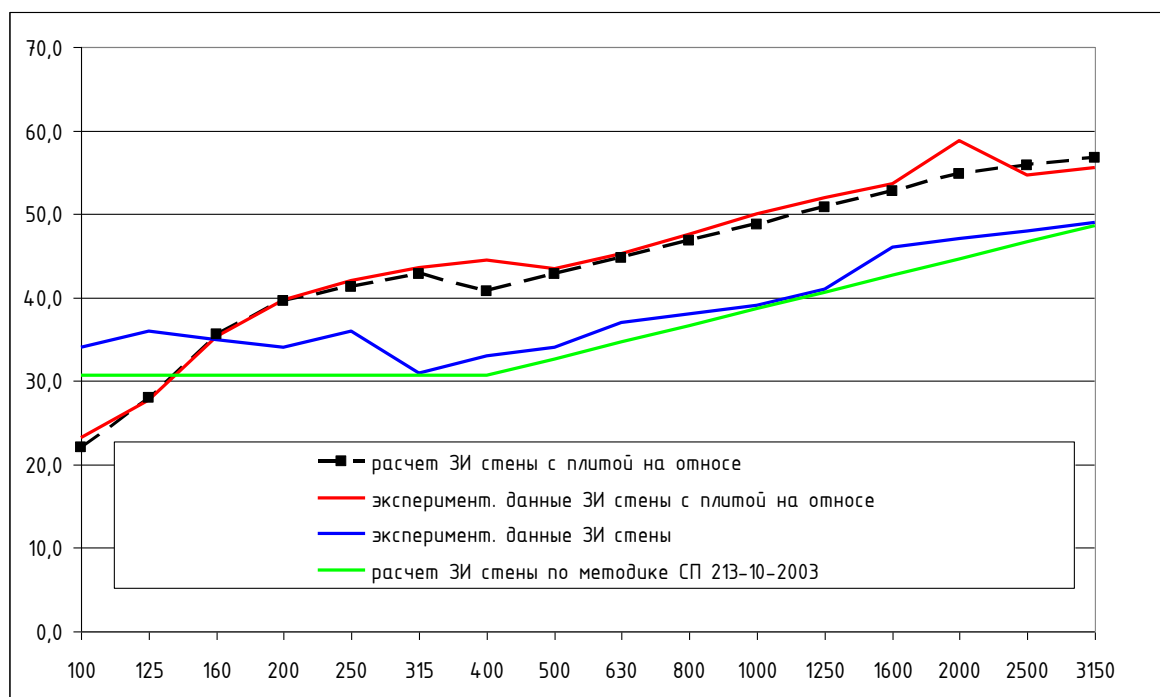


Рис. 8. Пример расчета звукоизоляции стенки из гипсобетона, толщиной 80 мм, с обшивкой на отnose 50 мм, из листа ГКЛ

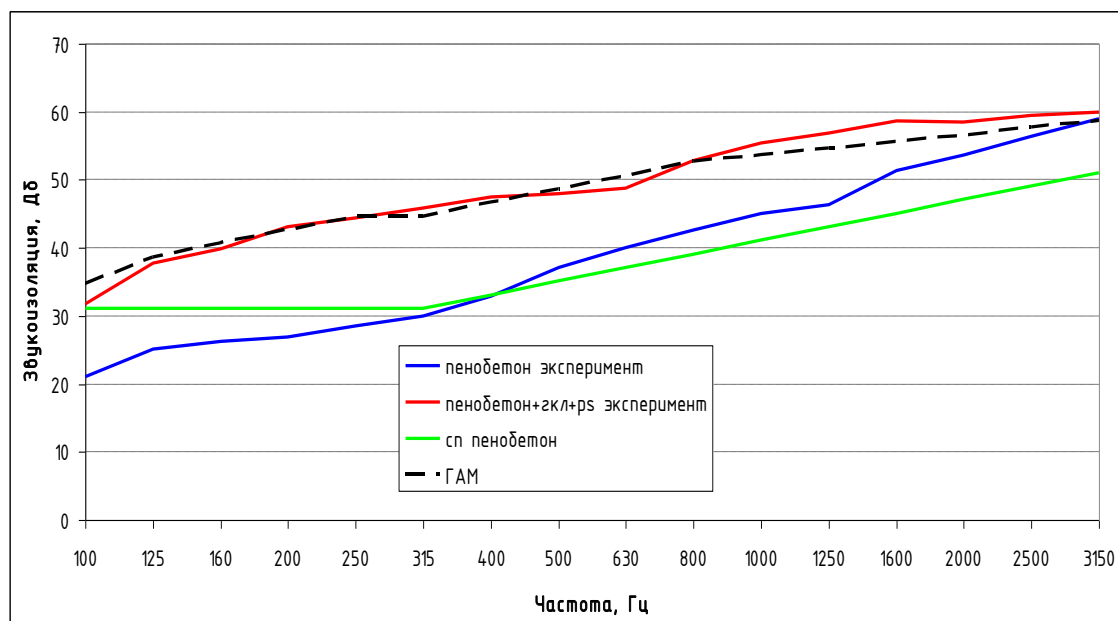


Рис. 9. Пример расчета звукоизоляции стенки из пенобетона, толщиной 100 мм, с обшивкой на отnose 27 мм, из листа ГКЛ и звукоизоляционной панели PhoneStar

Заклучение

Разработанный графоаналитический метод расчета звукоизоляции стен с плитой на отnose показал применимость к реальным конструкциям.

Метод может быть использован для оценки звукоизоляции конструкции специалистами, связанными с разработкой, проектированием средств снижения шума, сотрудниками институтов, работающих в области акустической экологии, архитекторами, дизайнерами, и др.

Список литературы

1. Щевьев Ю.П., Осташевский Е.Н. Средства акустической обработки помещений. – СПб, 2010. – 328 с.
2. Заборов В.И. М. И. Могилевский Справочник по защите от шума и вибрации в жилых и общественных зданий, 1989. – 160 с.
3. Крейтан В.Г. Защита от внутренних шумов в жилых домах. – Москва, 1990 г.
4. СП 23-103-2003. Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий. – Москва, 2004.

Определение уровня звука в расчётной точке от проходящего поезда

Брацлавский А.А.¹, Куклин Д.А.², Матвеев П.В.³

¹Доцент, ²Доцент, к.т.н., ³Ст. преподаватель, к.т.н.

^{1, 2, 3} БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В статье предлагаются методы расчета шума, создаваемого железнодорожным транспортом, в жилой застройке (расчётной точке). Шумовые характеристики отдельных поездов определяются в зависимости от типа поезда, его длины, скорости движения. Расчет шума производится исходя из предположения, что каждый вагон имеет одинаковую акустическую мощность в составе таких же вагонов. Шум в расчётной точке равен сумме интенсивностей дошедших до расчётной точки от каждого вагона.

Ключевые слова: методы расчёта шума, железнодорожный транспорт, типы поездов, источник шума, уровень звука, максимальный уровень звука.

Calculation of sound level in the reference point from a moving train

Bratclavskii A.A.¹, Kuklin D.A.², Matveev P.V.³

¹Associate professor, ²Associate professor, ³Senior lecturer

^{1, 2, 3} Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The article proposes the methods of noise calculation generated by railway transport, in residential areas (computational point). Noise characteristics of trains is determined depending on the type of train, length, speed. The noise calculation is made, assuming that each railway car has the same acoustic power in the composition of these same railway cars. The noise in the calculation point is equal to the sum of the intensities reached the estimated point from each railway car.

Keywords: noise analysis, railway transport, type of train, line noise source, sound level, ceiling sound level.

Введение

Процессы шумообразования железнодорожного подвижного состава можно разбить на три основные категории [1]:

- шум оборудования;
- шум качения;
- аэродинамический шум.

Шум оборудования (компрессоры, двигатели и др.) превалирует на скоростях до 50 км/ч.

Шум качения и аэродинамический шум зависят от скорости движения поезда.

Шум качения – процесс соударения в системе «колесо – рельс» превалирует в диапазоне скоростей 60-300 км/час. Аэродинамический шум, образованный обтеканием воздухом корпуса подвижного состава, пантографа и др. в основном проявляется на скоростях свыше 300 км/ч.

Также вклад в шумообразование оказывают вибрация корпуса, визг колёс в радиусах, соударение вагонов (шум сцепки), скрип при торможении, движение по

мостам и т.п.

Однако, на расстояниях сформировавшегося звукового поля, а особенно на больших расстояниях шум проходящего поезда воспринимается, как единый шум без выделения источников, но с характерной амплитудно-частотной характеристикой.

1. Расчет эквивалентного уровня звука поездов

Предлагаемая модель распространения звука позволяет оценить уровень звука с точностью 95% (погрешность в пределах 5 дБ) по методу определения уровня шума $L = L_{\text{ср.}} + k\sigma$ (испытания проводили в свободном акустическом поле).

Вместо W (звуковой мощности) можно использовать экспериментальные данные, соответствующие по ГОСТ 20444-85 [2] значениям уровня звука на расстоянии 25 м от оси пути.

Математическое моделирование распространения звуковых волн включает в себя совместное рассмотрение уравнения движения, состояния и непрерывности. Как правило, задача сводится к дифференциальному уравнению в частных производных – уравнению распространения звуковой волны.

В текущей работе приняты следующие допущения:

- высота источника шума над землёй – 1 м;
- сферическая форма фронта звуковой волны от каждого источника;
- в качестве источника принимаем один вагон в виде точки, с расстоянием a между источниками звука (между вагонами);
- количество источников звука W соответствует количеству вагонов k в поезде.
- отдельные источники звука считаем некогерентными.
- поезд движется с постоянной скоростью v ;
- начало отсчёта с момента времени, когда середина поезда находится в точке 0.

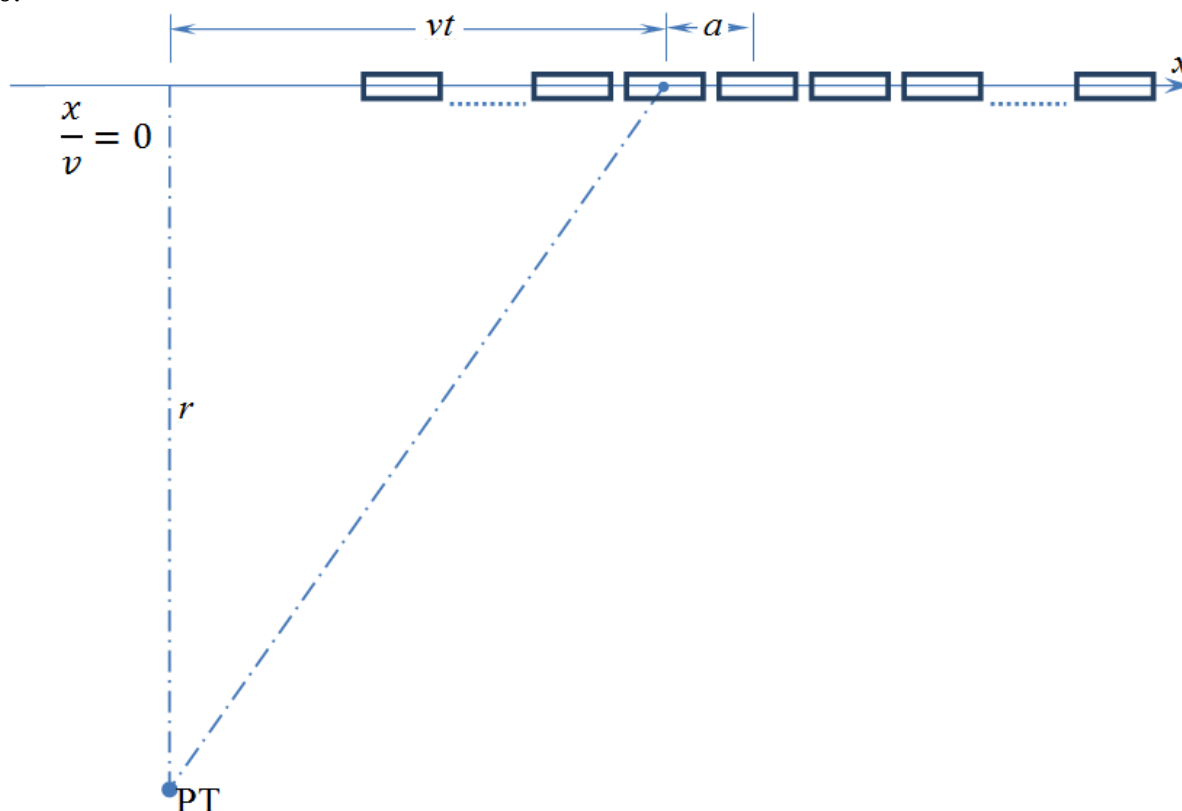


Рис. 1. Расчётная схема для определения уровня звука поезда

В качестве базового уравнения возьмём уравнение интенсивности звука в расчётной точке (РТ)

$$I = \frac{W(1-\alpha)}{4\pi} \cdot 2 \sum_{n=0}^k \frac{1}{r^2 + (vt + na)^2} \quad (1)$$

где $k - \frac{1}{2}$ от числа вагонов в составе, W – звуковая энергия, излучаемая одним вагоном, Вт, α – коэффициент звукопоглощения поверхности.

Поскольку состав движется, и звуковое воздействие от каждого вагона изменяется со временем, но при этом имеет максимум в момент времени, когда ровно половина состава оказывается напротив расчётной точки. Для определения суммарной интенсивности при прохождении состава мимо расчётной точки от момента превышения звука от состава над уровнем фона до максимального значения (половина состава напротив расчётной точки) до удаления состава на расстояние слияния шума поезда с фоновым шумом.

$$I = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{x_0}{2v}} I(t) dt$$

$$I = \frac{W(1-\alpha)}{\frac{x_0}{v} 2\pi r v} \sum_{n=0}^k \left(\arctg \frac{2na + vt_0}{2r} - \arctg \frac{2na - vt_0}{2r} \right) \quad (2)$$

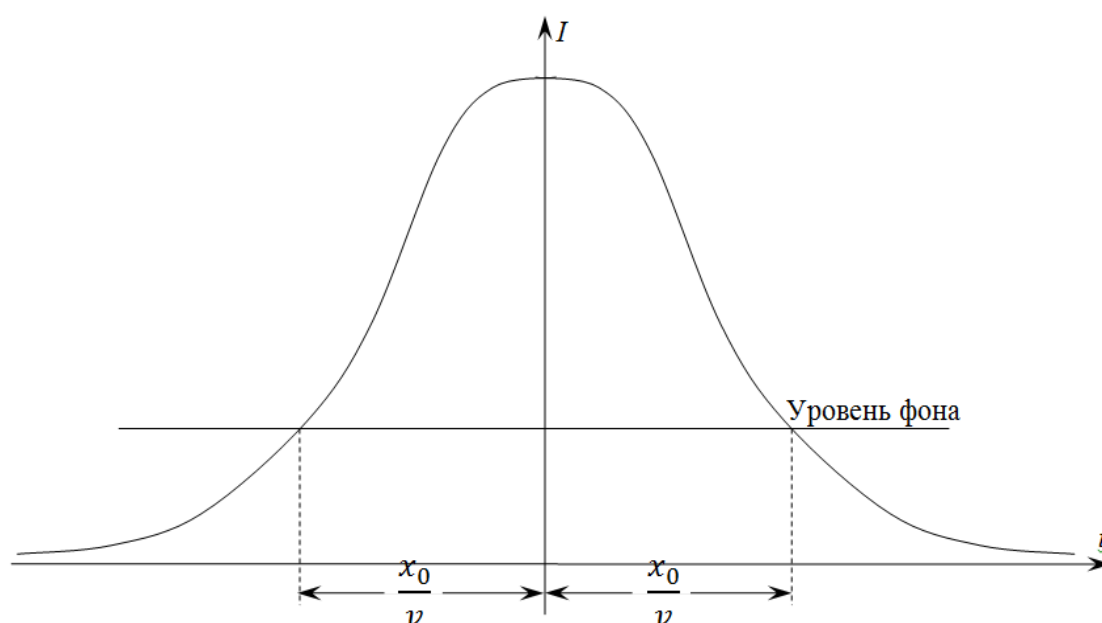


Рис. 2. Звук в расчётной точке за время прохождения поезда

Прологарифмировав обе части получим:

$$10 \lg I = 10 \lg W(1-\alpha) - 10 \lg 2\pi r x_0 + 10 \lg \sum_{n=0}^k \left(\arctan \frac{2na + x_0}{2r} - \arctan \frac{2na - x_0}{2r} \right) \quad (3)$$

Учитывая, что в свободном звуковом поле значения логарифмического уровня интенсивности и уровня звука отличаются на величину 0,16 дБ, можем говорить, что полученная зависимость (3) является зависимостью значения уровня звука в расчетной точке от проходящего поезда.

$$L = L_W(1 - \alpha) - 10 \lg 2\pi r x_0 + 10 \lg \sum_{n=0}^k \left(\arctan \frac{2na+x_0}{2r} - \arctan \frac{2na-x_0}{2r} \right) \quad (4)$$

дБА

Для нахождения расстояния x_0 , где шум поезда сливается с фоновым шумом, подставим вместо L уровень звука, например, 40 дБА, и выразим x_0 , что сделать нетрудно. При вычислении x_0 отбрасываем член с суммой арктангенсов.

2. Расчет максимального уровня звука поездов

Расчёт максимального уровня звука проводим из предположения, что в момент времени, когда середина поезда находится напротив расчётной точки, в расчётной точке имеем максимальные значения шума. Таким образом, максимальная интенсивность звука в расчётной точке выразим зависимостью:

$$I_{\max} = \frac{W(1-\alpha)}{2\pi} \sum_{n=0}^k \frac{1}{r^2 + (na)^2} \quad (5)$$

Прологарифмируем обе части зависимости:

$$10 \lg I_{\max} = 10 \lg L_W(1 - \alpha) - 10 \lg 2\pi + 10 \lg \sum_{n=0}^k \frac{1}{r^2 + (na)^2} \quad (6)$$

Для максимального уровня звука применимо то же замечание, что и для формулы (3) о приближённом равенстве значений логарифмического уровня интенсивности и уровня звука

$$L_{\max} = L_W(1 - \alpha) - 10 \lg 2\pi + 10 \lg \sum_{n=0}^k \frac{1}{r^2 + (na)^2}, \text{ дБА} \quad (7)$$

Таким образом, получаем зависимость для максимального уровня звука.

3. Уточняющие замечания

Если вместо W (L_W) использовать экспериментальные данные, соответствующие по ГОСТ 20444-85 [2] значениям уровня звука на расстоянии 25 м от оси пути (25 м – расстояние на котором измеряется внешний шум поезда в РФ), то формулы (4) и (7) могут быть записаны в виде

$$L = L_{25} - 10 \lg 2\pi r x_0 + 10 \lg \sum_{n=0}^k \left(\arctan \frac{2na+x_0}{2r} - \arctan \frac{2na-x_0}{2r} \right), \text{ дБА} \quad (8)$$

Для эквивалентного уровня звука и аналогично получим выражение для максимального уровня звука:

$$L_{\max} = L_{25} - 10 \lg 2\pi + 10 \lg \sum_{n=0}^k \frac{1}{r^2 + (na)^2}, \text{ дБА} \quad (9)$$

Предполагая зависимость внешнего шума поезда от скорости v доминирующей, представим значения уровня звука поезда на измеряемом расстоянии 25 м регрессионным уравнением:

$$L_{25} = a \lg v + b \quad (10)$$

где a и b – числовые коэффициенты.

Проведя измерения порядка 500 поездов разных типов и исходя из принципа, что уровень звука на расстоянии 25 м от оси пути подчиняется зависимости (10) [3], были выведены следующие экспериментальные формулы:

- для грузовых поездов:

$$L_{Aeq25} = 21 \cdot \lg v_{\text{гп}} + 48, \text{ дБА} \quad (11)$$

- для пассажирских поездов:

$$L_{Aeq25} = 26 \cdot \lg v_{\text{пп}} + 35, \text{ дБА} \quad (12)$$

- для моторвагонных поездов

$$L_{Aeq25} = 29 \cdot \lg v_{\text{мвп}} + 30, \text{ дБА} \quad (13)$$

- для высокоскоростных поездов

$$L_{Aeq25} = 41 \cdot \lg v_{\text{всп}} - 11, \text{ дБА} \quad (14)$$

где, $v_{\text{гп}}$ – скорость грузового поезда, $v_{\text{пп}}$ – скорость пассажирского поезда, $v_{\text{мвп}}$ – скорость моторвагонного поезда, $v_{\text{всп}}$ – скорость высокоскоростного поезда, км/ч.

Подставляя значения L_{Aeq25} в формулу 8 можем рассчитать значение уровня звука в расчётной точке. Если известны конкретные (измеренные на расстоянии 25 м от оси пути) характеристики внешнего шума, то можно подставить их.

Если возникает необходимость в определении спектральных характеристик шума, то эквивалентные уровни звукового давления, дБ, на расстоянии 25 м от оси пути в октавных полосах частот определяем путем сложения соответствующего эквивалентного уровня звука, дБА, рассчитанного согласно формулам 11...14 для своего типа поезда, со значениями относительных спектров, приведенными в таблице 1

Таблица 1

Относительные спектры шума железнодорожного транспорта

Источник шума	Относительная частотная характеристика, дБ, при среднегеометрических частотах октавной полосы, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Пассажирский поезд с локомотивной тягой	-12,6	-15,5	-18,4	-5,6	-3,7	-6,4	-11,5	-23,4
Грузовой поезд (все типы)	+2,8	-5,8	-6,0	-2,5	-5,2	-7,0	-12,1	-21,8
Электропоезд	-15,1	-17,0	-17,3	-4,3	-3,3	-6,2	-13,5	-24,2
Высокоскоростной поезд	+1,0	-4,5	-13,9	-7,2	-4,6	-5,1	-10,8	-19,4

Для максимального уровня звука на расстоянии 25 м от оси пути были определены свои зависимости, подчиняющиеся, однако, зависимости (10) [3].

Максимальный уровень звука L_{Amax25} , создаваемый поездами различных категорий на расстоянии 25 м от оси пути, рассчитывают по формулам:

– для грузовых поездов

$$L_{Amax25} = 15 \cdot \lg v_{гп} + 62 \quad (15)$$

– для пассажирских поездов

$$L_{Amax25} = 24 \cdot \lg v_{пп} + 43 \quad (16)$$

– для моторвагонных поездов

$$L_{Amax25} = 27 \cdot \lg v_{мвп} + 37 \quad (17)$$

– для высокоскоростных поездов

$$L_{Amax25} = 45 \cdot \lg v_{всп} - 18 \quad (18)$$

Подставляя значения, полученные в формулах 15...18 для каждого типа поезда в формулу 9, можем определить максимальный уровень звука в расчётной точке.

Если расчётом по формулам 15...18 получаем значения максимального уровня звука больше, чем на 15 дБ значений эквивалентного уровня звука, полученные по формулам 11...14, для отдельного типа поезда, то максимальный уровень звука принимаем по зависимости $L_{Amax25} - L_{Aeq25} + 15$, дБА.

Заключение

В данной работе предложены зависимости, пригодные для расчёта внешнего шума поездов в любой удалённой от путей точке в виде зависимостей для эквивалентного уровня звука, для максимального уровня звука, а так же для уровней звукового давления. Результаты данной работы были использованы при подготовки ГОСТ Р 54933 Шум. Методы расчета уровней внешнего шума, излучаемого железнодорожным транспортом.

Список литературы

1. Иванов Н.И., Куклин Д.А., Матвеев П.В., Олейников А.Ю. Снижение шума подвижного состава железнодорожного транспорта в источнике образования и на пути распространения // Защита от повышенного шума и вибрации: доклады V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Россия, Санкт-Петербург, 18-20 марта 2015 г.) / под ред. Н.И. Иванова - Санкт-Петербург: Изд-во «Айсинг», 2015. – С. 125-144.
2. ГОСТ 20444-85.Шум. Транспортные потоки. Методы измерения шумовой характеристики. М.: Изд-во стандартов, 1994. – 20 с.
3. Куклин Д.А., Матвеев П.В. Расчёт внешнего шум поездов // *Noise Theory and Practice*. 2015; 1 (2): С. 41-51 (http://media.noisetp.com/filer_public/62/95/6295880d-7d05-499a-bf74-b78e0ea958f4/page_47-51_rus.pdf).

Расчётные схемы определения шума от железнодорожного транспорта

Куклин Д.А.¹, Матвеев П.В.²

¹Доцент, к.т.н., ²Ст. преподаватель, к.т.н.

^{1, 2} БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В статье предлагаются методы расчета шума, создаваемого железнодорожным транспортом, на территории, прилегающей к железнодорожным путям, при наличии различных средств защиты от шума на пути распространения (ровный участок, выемка, насыпь, ближнее средство звукоизоляции). Шумовые характеристики в расчётной точке определяются в зависимости от типа шумозащитного устройства и длины поезда. Расчет шума производится, исходя из предположения, что каждый вагон имеет одинаковую акустическую мощность в составе таких же вагонов. Шум в расчётной точке равен сумме интенсивностей дошедших до расчётной точки от каждого вагона.

Ключевые слова: методы расчёта шума, железнодорожный транспорт, типы поездов, источник шума, уровень звука, максимальный уровень звука.

Calculation models of noise from rail transport

Kuklin D.A.¹, Matveev P.V.²

²Associate professor, ²Senior lecturer

^{1, 2} Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

This publication offers methods of calculation of noise generated by rail, adjacent to the railroad tracks, in the presence of various means of protection against noise in the direction of spread (level stretch, cutting, embankment, low barriers). Noise characteristics in the calculation point are determined depending on the type of sound insulating device and the length of the train. The noise calculation is made, assuming that each car has the same acoustic power in the composition of these same cars. The noise in the calculation point is equal to the sum of the intensities reached the estimated point from each railway car.

Keywords: noise analysis, railway transport, type of train, line noise source, sound level, ceiling sound level.

Введение

Шум качения генерируется высокоинтенсивными источниками звука. Принято, что уровни шума этих источников не превышают 130 дБ и акустические процессы излучения можно рассматривать как линейные. Другой особенностью является наличие ряда излучателей (колесных пар), расположенных друг от друга на расстояниях $r > \frac{\lambda}{6}$ [1]. По условию Е. Скучика такое условие позволяет считать эти излучатели некогерентными. С учетом расстояний граничная частота этого условия находится в пределах октавной полосы частот 63 Гц.

При рассмотрении процессов дивергенции поезда принимаются линейными источниками, излучающими цилиндрическую звуковую волну в свободное полупространство. Также рассматривается прохождение звука через препятствия (выемки, насыпи и пр.). Линейные источники звука приняты конечной длины в пределах от 100 до 1500 м. Границей существования цилиндрической звуковой волны

принято известное допущение:

$$R \leq \frac{l_{ист}}{\pi}, \quad (1)$$

где $l_{ист}$ – длина источника (поезда), м. При условии

$$R \geq 2l_{ист}, \quad (2)$$

Источник звука (поезд) принимается точечным источником сферической звуковой волны. В пределах

$$\frac{l_{ист}}{\pi} \leq R \leq 2l_{ист}, \quad (3)$$

Звуковая волна принимается квазицилиндрической.

Интерференционные явления, возникающие при распространении звука, не рассматриваются. При наличии препятствия длина препятствия принимается равной длине источника шума (поезда) [1].

1. Правило расчетов

Расчеты выполняются в соответствии с правилом, согласно которому (рис. 1):

$$W_{ист} \rightarrow I_1 \rightarrow W_1 \rightarrow I_2 \rightarrow W_2 \rightarrow \dots \rightarrow I_n \rightarrow W_n \rightarrow I_{PT} \quad (4)$$

где $W_{ист}$ – акустическая мощность источника, Вт;

I_1 – интенсивность звука на первой поверхности с первым импедансом, Вт/м²;

W_1 – акустическая мощность звука, излучаемого этой поверхностью, Вт;

I_2 и W_2 – то же для второй поверхности с новым импедансом;

I_n и W_n – то же для n -й поверхности;

I_{PT} – интенсивность звука в расчетной точке (РТ), Вт/м².

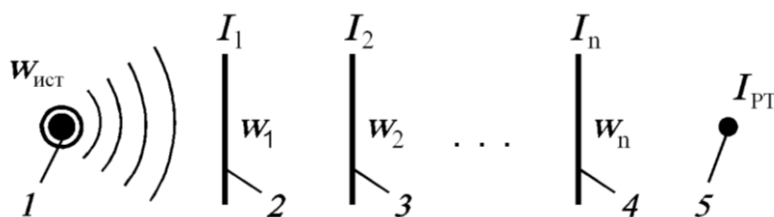


Рис. 1 Иллюстрация к правилу для вывода формулы в простейшем случае:

1 – источник звука; 2, 3, 4, ..., n -е переходные поверхности; 5 – расчетная точка

Исходной величиной в расчетах является акустическая мощность источника ($W_{ист}$), получаемая конечная величина – интенсивность звука в расчетной точке (I_{PT}).

Границы выполняемых расчетов определяются принятыми допущениями и приняты в частотном диапазоне 63-8000 Гц.

2. Описание расчетных схем

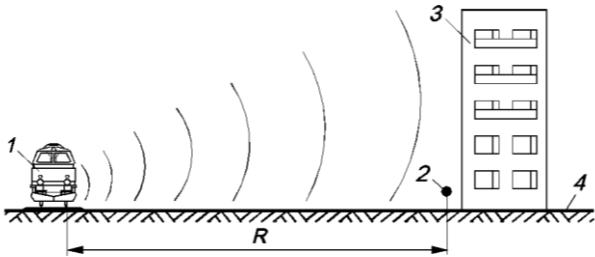
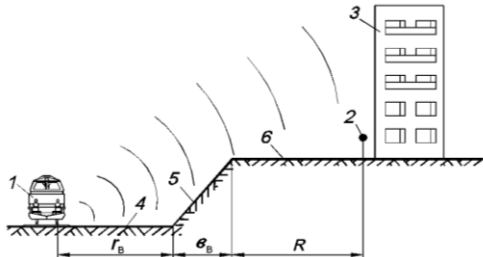
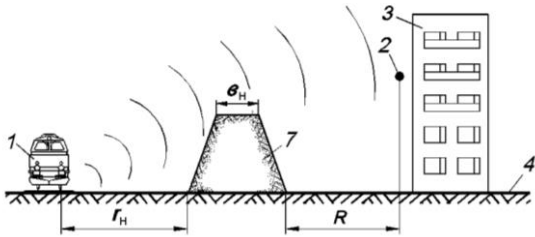
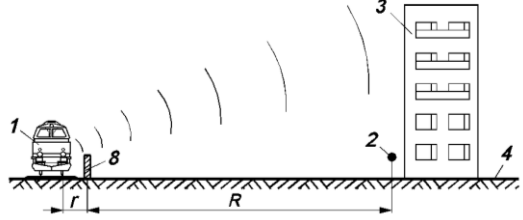
Были рассмотрены основные случаи распространения звука:

- в свободном пространстве;
- с препятствием в виде выемки;
- с препятствием в виде насыпи;

– при наличии препятствия – акустического экрана, расположенного близко к источнику шума (поезду).

Расчетные схемы приведены в табл. 1.

Таблица 1
Расчетные схемы

№ п/п	Вид схемы	Обозначения на схеме	Примечание
1		1 – источник шума (ИШ); 2 – расчетная точка (РТ); 3 – защищаемый от шума объект; 4 – опорная поверхность;	Звук распространяется в свободном звуковом поле
2		5 – выемка; 6 – поверхность между вершиной выемки и РТ;	Учитывается поглощение звука поверхностями
3		7 – насыпь;	Двойная дифракция
4		8 – ближнее средство звукоизоляции	БСЗ расположено в условиях диффузного звукового поля

3. Распространение звука от линейного источника в свободном звуковом поле

При излучении в полупространство интенсивность звука в РТ определяется:

$$I_{РТ} = \frac{W_{ист}(1-\alpha_{нов})}{\pi l \sqrt{R^2 + h_{РТ}^2}} \arctg \frac{l_{ист}}{2\sqrt{R^2 + h_{РТ}^2}}, \text{ Вт/м}^2, \quad (5)$$

где $l_{ист}$ – длина ИШ, м; $\alpha_{нов}$ – коэффициент звукопоглощения опорной поверхности; R – расстояние от ИШ до расчетной точки, м; $h_{РТ}$ – высота расчетной точки, м.

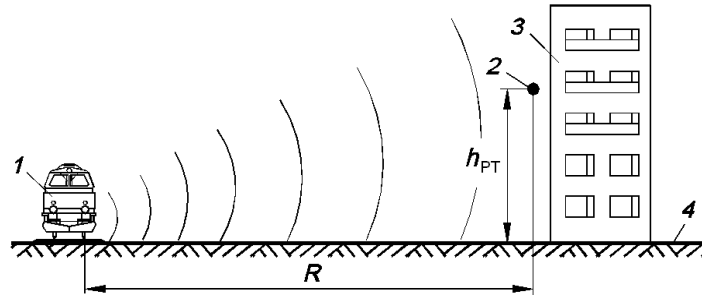


Рис. 2 Схема распространения звука от источника в полупространство в свободном звуковом поле: 1 – ИШ; 2 – РТ; 3 – здание; 4 – подстилающая (опорная) поверхность

Прологарифмировав обе части, получим формулу расчета УЗД (УЗ) в РТ при известных значениях уровней звуковой мощности источника ($L_{W_{ист}}$):

$$L_{PT} = L_{W_{ист}} + 10 \lg \arctg \frac{l}{2\sqrt{R^2 + h_{PT}^2}} + 10 \lg(1 - \alpha_{ног}) - 10 \lg \pi l - 10 \lg \sqrt{R^2 + h_{PT}^2}, \text{ дБ}, \quad (6)$$

В практике акустических расчетов линейных источников в качестве исходных значений выбираются измеренные или рассчитанные УЗД (УЗ) на опорном расстоянии 25 м для поездов, поэтому сделаем следующие преобразования:

Чтобы получить УЗ вместо УЗМ запишем формулу (6) для опорного расстояния, которое обозначим r_0 :

$$L_{r_0} = L_{W_{ист}} + 10 \lg \arctg \frac{l}{2r_0} + 10 \lg(1 - \alpha_{ног}) - 10 \lg \pi l - 10 \lg r_0, \text{ дБ}, \quad (7)$$

Проведя операцию вычитания выражения (7) из выражения (6) переходим к использованию в качестве исходных параметров линейного источника шума УЗ и УЗД, после преобразований:

$$L_{PT} = L_{25} + 10 \lg \arctg \frac{l}{2\sqrt{R^2 + h_{PT}^2}} + 10 \lg(1 - \alpha_{ног}) - 10 \lg \frac{\sqrt{R^2 + h_{PT}^2}}{25} - 10 \lg \arctg \frac{l}{50}, \quad (8)$$

где для удобства понимания исходных значений вместо L_{r_0} введена привязка к расстоянию L_{25} .

Сравнивая формулы (6) и (8) можно увидеть, что переход осуществляется заменой:

$$L_{25} = L_{W_{ист}} - 10 \lg \pi l - 10 \lg \arctg \frac{l}{50} \quad (9)$$

Анализ формулы (9) показывает, что здесь, кроме снижения шума от линейного источника с увеличением расстояния (дивергенция), учитывается поправка на его длину.

4 Распространение звука от поезда, расположенного в выемке

Схема распространения звука от поезда, расположенного в выемке представлена на рис. 3.

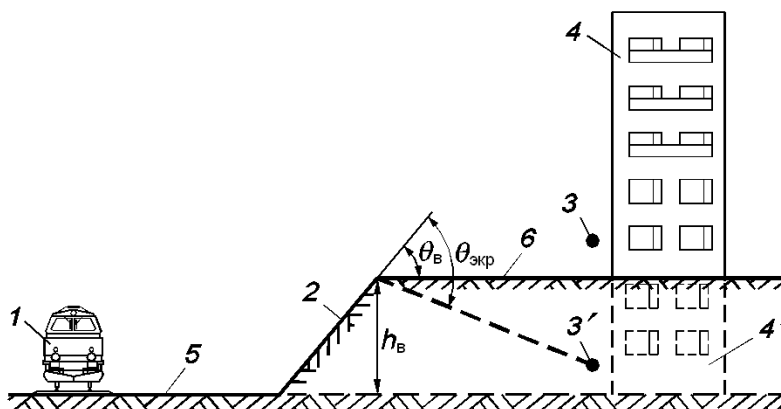


Рис. 3 Схема распространения звука от поезда, расположенного в выемке:
1 – ИШ; 2 – выемка; 3 – РТ; 4 – защищаемый объект; 5 – опорная поверхность между ИШ и основанием выемки; 6 – поверхность между вершиной выемки и РТ; 3' и 4' – расчетная точка и защищаемый объект, условно расположенный на одной плоскости с опорной поверхностью

Интенсивность звука, падающего на основание выемки

$$I_{над} = \frac{W_{усл}(1-\alpha_{он})}{\pi r_6 l_6} \arctg \frac{l_6}{2r_6} \quad (10)$$

где $\alpha_{он}$ – коэффициент звукопоглощения опорной поверхности;

r_6 – расстояние от ИШ до основания выемки, м;

l_6 – длина выемки (длина ИШ условно принята равной длине выемки), м.

Мощность звукового поля в нижней части выемки

$$W_H = I_{над} r_6 l_6 \quad (11)$$

Особенностью экранирующего эффекта выемки является то, что угол дифракции выемки (θ_6) больше угла дифракции ($\theta_{экр}$), например, экрана, если бы он был установлен взамен выемки. Поэтому в расчете должна рассматриваться не полная высота выемки, а эффективная высота, равная

$$h_{эф}^6 = h_6 - h_6 \sin \varphi \quad (12)$$

где h_6 – высота выемки, м;

$$\varphi = \theta_{экр} - \theta_6 \quad (13)$$

С учетом излучения звука в $1/4$ пространства интенсивность звука на краю выемки

$$I_6 = \frac{W_H(1-\alpha_6)}{\frac{\pi}{2} l_6 h_{эф}^6} \arctg \frac{l_6}{2h_{эф}^6} \quad (14)$$

где α_6 – коэффициент звукопоглощения склона выемки.

Мощность, излучаемая краем выемки:

$$W_{\epsilon} = I_{\epsilon} l_{\epsilon} \lambda \beta_{\text{дифр}}^{\epsilon} \quad (15)$$

где λ_{ϵ} – длина звуковой волны, м;

$\beta_{\text{дифр}}^{\epsilon}$ – коэффициент дифракции выемки.

Интенсивность звука в РТ с учетом звукопоглощающих свойств поверхности между краем выемки и РТ

$$I_{\text{РТ}} = \frac{W_{\epsilon} (1 - \alpha_{\text{нов}})}{\pi l_{\epsilon} R_{\epsilon}} \arctg \frac{l_{\epsilon}}{2R_{\epsilon}} \quad (16)$$

где R_{ϵ} – расстояние от края выемки до РТ, м.;

$\alpha_{\text{нов}}$ – коэффициент звукопоглощения поверхности между краем выемки и РТ.

Подставим (10), (11), (14), (15) в (16)

$$I_{\text{РТ}} = \frac{2W_{\text{учт}} (1 - \alpha_{\text{он}}) r_{\epsilon} l_{\epsilon} (1 - \alpha_{\epsilon}) l_{\epsilon} \lambda \beta_{\text{дифр}}^{\epsilon} (1 - \alpha_{\text{нов}}) \arctg \frac{l_{\epsilon}}{2r_{\epsilon}} \arctg \frac{l_{\epsilon}}{2h_{\text{эф}}^{\epsilon}} \arctg \frac{l_{\epsilon}}{2R_{\epsilon}}}{\pi l_{\epsilon} \pi l_{\epsilon} h_{\text{эф}}^{\epsilon} \pi l_{\epsilon} R_{\epsilon}} \quad (17)$$

Выполнив упрощения и прологарифмировав обе части, получим:

$$L_{\text{РТ}} = L_{W_{\text{учт}}} + 10 \lg(1 - \alpha_{\text{он}}) + 10 \lg(1 - \alpha_{\epsilon}) + 10 \lg(1 - \alpha_{\text{нов}}) + 10 \lg \pi l_{\epsilon} - 10 \lg \frac{h_{\text{эф}}^{\epsilon}}{\lambda} + \text{ПД}_{\text{выем}} - \\ - 10 \lg \frac{R_{\epsilon}}{r_0} - 10 \lg \pi^2 + 10 \lg 2 + 10 \lg \arctg \frac{l_{\epsilon}}{2r_{\epsilon}} + 10 \lg \arctg \frac{l_{\epsilon}}{2h_{\text{эф}}^{\epsilon}} + 10 \lg \arctg \frac{l_{\epsilon}}{2R_{\epsilon}} \quad (18)$$

где ПД – показатель дифракции выемки – отношение дифрагированного через край выемки звука к падающему звуку ($\text{ПД} = 10 \lg \beta_{\text{дифр}}^{\epsilon}$).

С учетом (18) и после некоторых преобразований:

$$L_{\text{РТ}} = L_{25} - 10 \lg \frac{h_{\text{эф}}^{\epsilon}}{\lambda} - 10 \lg \frac{R_{\epsilon}}{r_0} + \text{ПД}_{\text{выем}} + 10 \lg(1 - \alpha_{\text{он}}) + 10 \lg(1 - \alpha_{\epsilon}) + 10 \lg(1 - \alpha_{\text{нов}}) + \\ + 10 \lg \arctg \frac{l_{\epsilon}}{2r_{\epsilon}} + 10 \lg \arctg \frac{l_{\epsilon}}{2h_{\text{эф}}^{\epsilon}} + 10 \lg \arctg \frac{l_{\epsilon}}{2R_{\epsilon}} - 10 \lg \arctg \frac{l_{\epsilon}}{50} - 10 \lg \pi^2, \text{ дБ} \quad (19)$$

где L_{25} – УЗД (УЗ), измеренные на расстоянии 25 м от ИШ, дБ (дБА).

Отметим, что понятие показателя дифракции выемки вводится впервые.

5. Распространение шума за насыпь

Расчетная схема представлена на рис. 4. Интенсивность звука на вершине насыпи со стороны ИШ (излучение в $\frac{1}{4}$ пространства):

$$I_{\text{н}} = \frac{W_{\text{учт}}}{\frac{\pi}{2} l_{\text{н}} h_{\text{эф}}^{\text{н}}} \arctg \frac{l_{\text{н}}}{2h_{\text{эф}}^{\text{н}}}, \quad (20)$$

где $l_{\text{н}}$ – длина насыпи, м; $h_{\text{эф}}^{\text{н}}$ – эффективная высота насыпи, м.

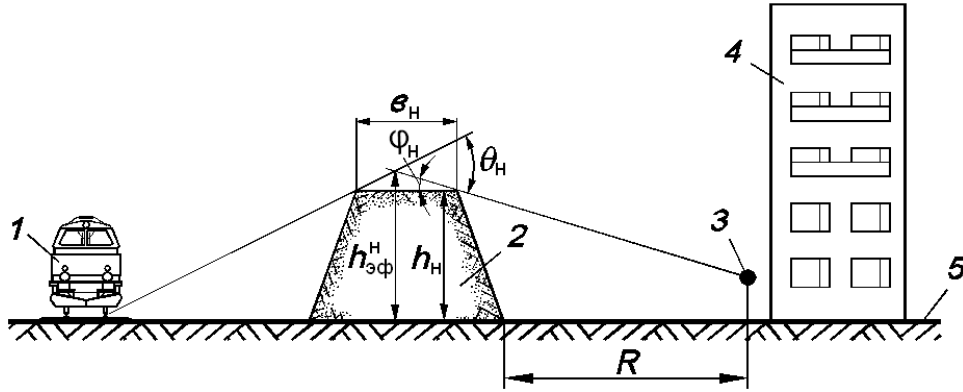


Рис. 4. Схема распространения звука за насыпь:

1 – ИШ; 2 – насыпь; 3 – РТ; 4 – защищаемый от шума объект; 5 – опорная поверхность; θ_n – угол дифракции насыпи; φ_n – угол между поверхностью насыпи и лучом от РТ до ближней вершины насыпи; h_n – высота насыпи; h_n^H – перпендикуляр от точки пересечения лучей (от ИШ до вершины насыпи и от РТ до другой вершины насыпи) на основание насыпи

$$h_n^H = h_n + e_n \sin \varphi_n \quad (21)$$

где φ_n – см. рис. 4; h_n – высота насыпи, м; e_n – ширина насыпи, м.

Условно принимаем, что излучение звука происходит частью насыпи шириной 1 м, тогда звуковая мощность, излучаемая этой частью насыпи:

$$W_n = I_n 1 l_n \beta_{дифр}^H, \quad (22)$$

где $\beta_{дифр}^H$ – коэффициент дифракции насыпи.

Интенсивность звука в противоположной части насыпи

$$I_n' = \frac{W_n (1 - \alpha_n)}{\pi l_n e_n} \arctg \frac{l_n}{2 e_n}, \quad (23)$$

где e_n – ширина насыпи, м; α_n – коэффициент звукопоглощения насыпи.

Мощность звука, излучаемого противоположной частью насыпи:

$$W_n' = I_n' \lambda l_n \beta_{дифр}^H, \quad (24)$$

Интенсивность звука в РТ:

$$I_{РТ} = \frac{W_n'}{2 \pi l_n R_n} \arctg \frac{l_n}{2 R_n}, \quad (25)$$

где R_n – расстояние от насыпи до РТ, м.

Подставив (20), (22-24) в (25) получим:

$$I_{РТ} = \frac{W_{ист} (1 - \alpha_n) \cdot l_n \beta_{дифр}^H \lambda l_n \beta_{дифр}^H}{2 \frac{\pi}{2} l_n h_n^H \pi l_n e_n \pi l_n R_n} \times \arctg \frac{l_n}{2 h_n^H} \arctg \frac{l_n}{2 e_n} \arctg \frac{l_n}{2 R_n} \quad (26)$$

После преобразований с учетом:

$$L_{PT} = L_{25} + 10 \lg(1 - \alpha_n) + ПД_{нас} - 10 \lg \frac{h_{эф}^n}{\lambda} - 10 \lg \frac{\epsilon_n R_n}{\epsilon_0 r_0} +$$

$$+ 10 \lg \operatorname{arctg} \frac{l_n}{2h_{эф}^n} + 10 \lg \operatorname{arctg} \frac{l_n}{2\epsilon_n} + 10 \lg \operatorname{arctg} \frac{l_n}{2R_n} - 10 \lg \operatorname{arctg} \frac{l_n}{50} - 10 \lg \pi^2, \text{дБ} \quad (27)$$

где $ПД_{нас}$ – показатель дифракции насыпи ($ПД - 20 \lg \beta_{дифр}^n$)

$\epsilon_0 = 1$; $r_0 = 1$

Снижение шума насыпью зависит от ее звукопоглощения, высоты, ширины верхней части. Понятие показатель дифракции насыпи вводится впервые.

6. Распространение звука при наличии средств ближней звукоизоляции

Применения средств снижения шума качения в источнике не обеспечивает снижения шума до требуемых величин. Эффективной мерой снижения шума на пути распространения от источника является применение средств ближней звукоизоляции (СБЗ). В качестве такого средства может рассматриваться преграда в виде малого акустического экрана, расположенного вблизи головки рельса в пределах разрешенных габаритов. Расчетная схема такого расположения показана на рис. 5.

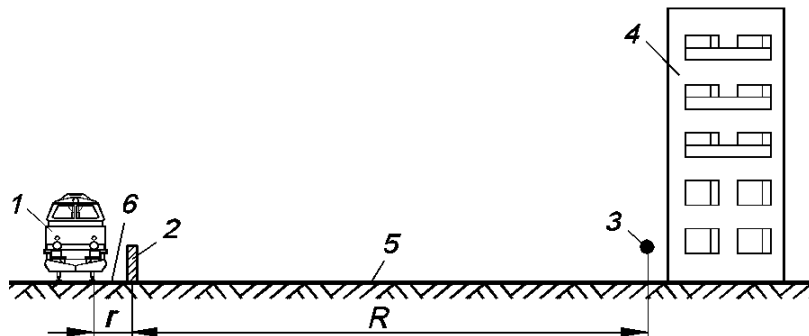


Рис. 5. Расчетная схема СБЗ:

- 1 – источник шума (пара колесо–рельс); 2 – СБЗ; 3 – расчетная точка (РТ);
4 – защищаемый от шума объект; 5 – опорная поверхность между СБЗ и РТ;
6 – опорная поверхность между источником шума и СБЗ

Рассматривается звуковое поле в замкнутом объеме, образованное:

– элементами подвижного состава (тележка, нижняя часть корпуса подвижного состава);

- отражающей поверхностью между источником шума и СБЗ;
- свободным проёмом в верхней части;
- ближним средством звукоизоляции.

Основные допущения, принятые при выводе формулы:

- звуковое поле в полузамкнутом объеме принимается квазидиффузным;
- источник шума (ИШ) принят линейным излучателем;
- высота источника шума принята равной высоте СБЗ ($h_{ист}$), т.е. $h_{ист} = h_{э}$;
- длина ИШ ($l_{ист}$) принята равной длине СБЗ ($l_{э}$), т.е. $l_{ист} = l_{э}$;
- свободное ребро СБЗ принято вторичным линейным излучателем;
- в связи с малой высотой СБЗ учитываются поглощающие свойства опорной поверхности между СБЗ и расчётной точкой.

Звук, падающий на верхнее свободное ребро СБЗ:

$$I_{nad} = \frac{4W_{uct}}{\psi_{об} B_{об}} \quad (28)$$

где: $\psi_{об}$ – коэффициент, показывающий степень диффузности звукового поля в объеме; $B_{об}$ – акустическая постоянная объема, м³

$$B_{об} = \frac{A_{об}}{1 - \bar{\alpha}_{об}} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i}{(1 - \bar{\alpha})} \quad (29)$$

где: $A_{об}$ – эквивалентная площадь поглощения незамкнутого объема, м²; α_i – коэффициент звукопоглощения i -ой поверхности, образующей незамкнутый объем площадью S_i ; $\bar{\alpha}$ – средний коэффициент звукопоглощения незамкнутого объема.

После преобразований:

$$B_{об} = \frac{l_3 h_3 \alpha_3 + l_3 h_3 \alpha_u + l_3 r \alpha_u + l_3 r}{(1 - \bar{\alpha}_{об})} = \frac{l_3 (h_3 \alpha_3 + h_3 \alpha_u + r \alpha_u + r)}{(1 - \bar{\alpha}_{об})}, \quad (30)$$

где h_3, l_3 – высота и длина БСЗ соответственно; α_3 – коэффициент звукопоглощения БСЗ; α_u – коэффициент звукопоглощения источника шума (со стороны БСЗ); r – расстояние от ИШ до БСЗ, м.

Значение $\bar{\alpha}_{об}$ определяется: $\bar{\alpha}_{об} = \frac{A_{об}}{S_{об}}$, где: $S_{об}$ – площадь всех поверхностей, образующих незамкнутый объем $S_{об} = 2S_3 + 2S_n = 2(S_3 + S_n)$, где: $S_3 = h_3 l_3$; $S_n = h_3 r$.

После некоторых преобразований формула (28) может быть представлена в виде:

$$I_{nad} = \frac{4W_{uct}(1 - \bar{\alpha}_{об})}{l_3 (h_3 \alpha_3 + h_3 \alpha_{uct} + r \alpha_{нов} + r) \psi_{об}}, \quad (31)$$

Акустическая мощность, излучаемая верхним свободным ребром БСЗ: $W_p = I_{nad} l_3 r \beta_{дифр}$, где $\beta_{дифр}$ – коэффициент дифракции БСЗ, а r – расстояние от ИШ до БСЗ, м. Интенсивность звука в расчётной точке с учётом звукопоглощающих свойств опорной поверхности:

$$I_{PT} = \frac{W_p (1 - \bar{\alpha}_{нов})}{2\pi l_3 R} \arctg \frac{l_3}{2R} \quad (32)$$

где R – расстояние от БСЗ до расчётной точки; $\alpha_{нов}$ – коэффициент звукопоглощения поверхности между БСЗ и РТ.

С учётом сказанного зависимость (32) представим

$$I_{PT} = \frac{4W_{uct}(1 - \bar{\alpha}_{об})(1 - \bar{\alpha}_{нов})l_3 r \beta_{дифр}}{\psi_{об} l_3 (h_3 \alpha_3 + h_3 \alpha_{uct} + r \alpha_{нов} + r) 2\pi l_3 R} \quad (33)$$

После преобразований и логарифмирования обеих частей, приняв $10 \lg \beta_{дифр} = ПД$, получим:

$$L_{PT} = L_{25} + 10 \lg(1 - \alpha_{об}) + 10 \lg(1 - \alpha_{нос}) + ПД - 10 \lg \frac{R}{r} - 10 \lg \psi_{об} - 10 \lg A + \\ + 10 \lg \arctg \frac{l_3}{50} + 10 \lg \frac{l_3}{2R} + 3, \text{ дБ} \quad (34)$$

Заключение

Рассмотренные схемы позволяют выбрать оптимальные средства защиты при разработке шумозащитных мероприятий при строительстве жилой застройки, разработке мероприятий по защите природных территорий, при строительстве железных дорог.

Список литературы

1. Иванов Н.И., Куклин Д.А., Матвеев П.В., Олейников А.Ю. Снижение шума подвижного состава железнодорожного транспорта в источнике образования и на пути распространения // Защита от повышенного шума и вибрации: доклады V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Россия, Санкт-Петербург, 18-20 марта 2015 г.) / под ред. Н.И. Иванова – Санкт-Петербург: Изд-во «Айсинг», 2015 С. – 125–144.

Оценка уровней акустического загрязнения на территории спортивно-оздоровительной базы

Васильев А.П.¹, Ли-Ко-Шин Ю.А.², Синькова В.А.³
^{1, 2, 3} Студент, Балтийский государственный университет
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Россия, г. Санкт-Петербург

Аннотация

В статье показана актуальность проблемы борьбы с шумом, масштабы акустического загрязнения. В данном исследовании рассмотрена спортивно оздоровительная база, территория которой подвергается повышенному воздействию шума, что негативно влияет на отдыхающих. А также предложены меры по защите данной территории от шума, с помощью акустических экранов. Основным источником шума является автомагистраль.

Ключевые слова: акустическое загрязнение, шумозащита, карты шума, автомагистраль.

Estimation of acoustic contamination levels in the area of sports and recreation base

Vassilyev A.P.¹, Li-Ko-Shin J.A.², Sinkova V.A.³
^{1, 2, 3} Student, Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov,
Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The article shows the urgency of the problem of noise control, the extent of noise pollution. In this research we consider improving the sports facilities, have high level of noise. The main source of noise is the motorway. And also measures for the protection of the territory, using noise barriers.

Key words: acoustic pollution, sound protection, noise map, highway.

Введение

На сегодня повышенный шум является одним из наиболее вредных экологических факторов. Эта проблема ощущается особенно остро на селитебных территориях, приближенных к оживленным транспортным магистралям. Шум, даже когда он невысок (при уровнях 50-60 дБА) значительно действует на нервную систему человека, оказывая на него психологическое воздействие. Многочисленные исследования показали, что уровни транспортного шума, проникающего в жилые помещения зданий и на селитебные территории, во многих случаях значительно превышают санитарные нормы. В последние годы устанавливается тенденция снижения различий между уровнями шума в дневное и ночное время на территориях, прилегающих к автотрассам. Шумовые характеристики большинства автомобильных магистралей незначительно меняются в течение суток (за исключением периода с 3 до 5 часов утра) за счет того, что в ночное время снижение количества автотранспорта компенсируется ростом скорости транспортного потока. В результате транспортный шум оказывает неблагоприятное воздействие на здоровье населения, что приводит к многочисленным жалобам. Для обоснованного принятия решений по выбору мер снижения шума необходимо знать существующую шумовую обстановку, иметь достоверные данные о ее распределении на территории.

* E-mail: lik.yuliya@yandex.ru (Ли-Ко-Шин Ю.А.), liamaev@gmail.com (Васильев А.П.), sinkova.tinok@gmail.com (Синькова В.А.)

В данной статье рассматривается моделирование акустической нагрузки от автотранспортного потока на территории спортивно-оздоровительной базы, расположенной на 78 км Приозерского шоссе и пути снижения шума.

1. Методика и результаты проведения инструментальных измерений

Исходными данными для расчета акустической нагрузки на территории спортивно-оздоровительной базы служили шумовые характеристики транспортного потока. Измерения шумовой характеристики транспортного потока проводились в соответствии с ГОСТ 20444-2014. Измерения проводились при отсутствии атмосферных осадков, скорость ветра не превышала 5 м/с, микрофон оборудовался ветрозащитным экраном. При проведении измерений шумовой характеристики автотранспортного потока измерительный микрофон располагался на расстоянии $(7,5 \pm 0,2)$ м от оси ближней к точке измерения полосы на высоте $(1,5 \pm 0,1)$ м от уровня покрытия проезжей части (измерительная точка 1) (рис. 1). Результаты измерений представлены в Таблице 1.

Синхронно с проведением измерений шумовой характеристики транспортного потока проводились измерения шума на территории спортивно-оздоровительной базы в 2 м от фасадов жилых корпусов в соответствии с ГОСТ 23337-2014 (измерительная точка 2). Результаты измерения приведены в Таблице 2.

В результате натурных замеров уровней шума выявлено, что эквивалентные уровни звука на территории спортивно-оздоровительной базы, возле строений первого эшелона застройки, составляют для дневного времени суток 59 дБА, для ночного времени суток – 61 дБА, а максимальные уровни звука 65 дБА для дневного времени суток и 66 дБА для ночного времени суток. Сравнение с предельно-допустимыми уровнями приведено в Таблице 2. В качестве справочной информации в Таблице 3 приведены измеренные значения уровней звукового давления.



Рис. 1. Проведение измерений шумовой характеристики автотранспортного потока

Таблица 1

Результаты измерения шумовой характеристики транспортного потока

Количество автотранспортных средств по видам в потоке за временной интервал наблюдения T = 60 мин							Шумовая характеристика потока за временной интервал наблюдения T = 60 мин.	
Время суток	Легковые автомобили	Грузовые автомобили, автопоезда	Автобусы, Троллейбусы	Мотоциклы, мотороллеры, мопеды и мотовелосипеды	Другие виды автотранспортных средств, не указанные в столбцах 1 - 4	Средняя скорость движения автотранспортного потока, км/ч	Эквивалентный уровень звука $L_{Aeq}^{авт}$ потока, дБА	Максимальный уровень звука $L_{Amax}^{авт}$ потока, дБА
	1	2	3	4	5	6	7	8
День	618	47	21	2	32	90	79,7	110,5
Ночь	693	69	1	1	24	90	77,3	98,5

Таблица 2

Сравнение результатов измерения шума возле жилой застройки с допустимыми нормами

Время суток	Эквивалентный уровень звука L_{Aeq} , дБА	Максимальный уровень звука L_{Amax} , дБА
Результаты измерения шума возле жилой застройки		
7-23 ч.	59	65
23-7 ч.	61	66
Допустимые эквивалентные и максимальные уровни звука проникающего шума в помещениях жилых и общественных зданий и шума на территории непосредственно прилегающие к жилым домам, зданиям поликлиник, зданиям амбулаторий, диспансеров, домов отдыха, пансионатов, домов-интернатов для престарелых и инвалидов, детских дошкольных учреждений, школ и других учебных заведений, библиотек. Согласно СН 2.2.4/2.1.8.562-96.		
7-23 ч.	55	70
23-7 ч.	45	60
Превышение эквивалентного и максимального уровней звука над допустимыми уровнями		
7-23 ч.	4	—
23-7 ч.	16	6

Таблица 3

Значения уровней звукового давления возле жилой застройки

Время суток	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
День	59	64	58	52	54	56	52	39	29
Ночь	59	64	57	52	54	58	54	40	36

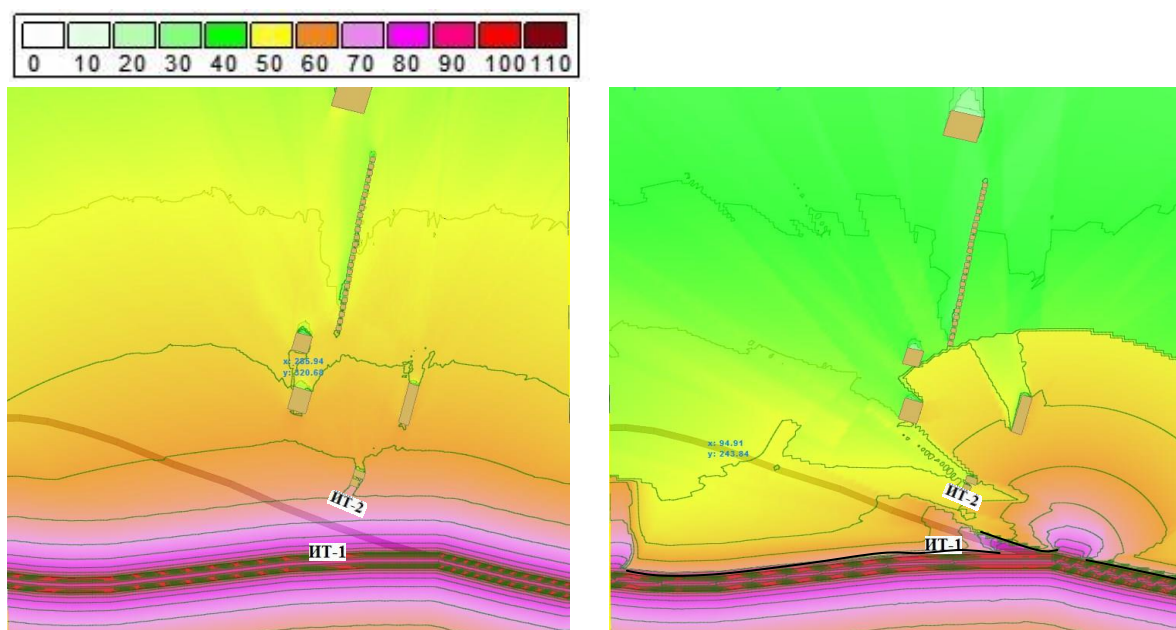
2. Построение карты шума с помощью программы АРМ «Акустика» 3D

Моделирование акустической нагрузки на территории спортивно - оздоровительной базы выполнялось в программе АРМ «Акустика» 3D. Исходными данными для построения карты шума послужили результаты инструментальных замеров шумовой характеристики транспортного потока. На карте шума отражено распространение уровней звука на высоте 1,5 метра. Построение карты шума проводилось с учётом особенностей рельефа и зелёных насаждений. В качестве

предлагаемого средства шумозащиты был выбран акустический экран. Параметры экрана выбирались из условия обеспечения предельно-допустимых уровней на территории защищаемого объекта.

На рисунках 2-5 приведено сравнение моделей распространения шума от автомагистрали, построенных при помощи программы «АРМ-Акустика».

На рисунках 2а, 3а, 4а, 5а показано распространение максимальных уровней звука и эквивалентных уровней звука днем и ночью, превышение предельно-допустимых уровней составило 6 дБА и 16 дБА ночью для максимальных и эквивалентных уровней звука соответственно, днем предельно-допустимые уровни звука превышены только по максимальному на 4 дБА. В качестве мероприятий по снижению уровней шума на территории спортивно-оздоровительной базы, был предложен шумозащитный (акустический) экран. Распространение шума, при использовании шумозащитного экрана показано на рис. 2б, 3б, 4б, 5б. Из рисунков следует, что после установки шумозащитного экрана уровни шума не будут превышать предельно допустимых значений.



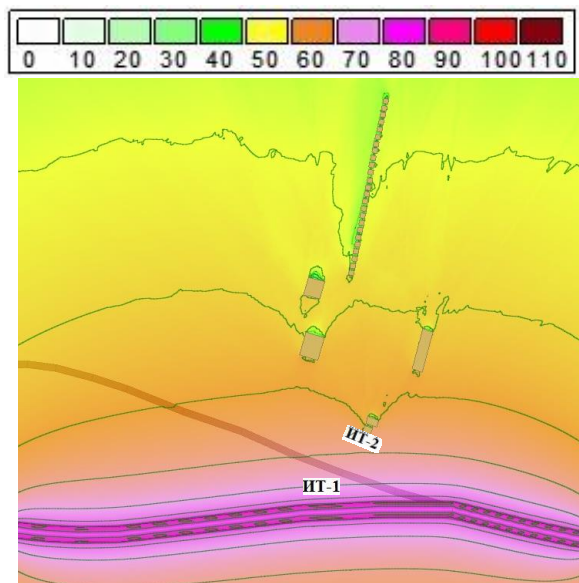
а)

б)

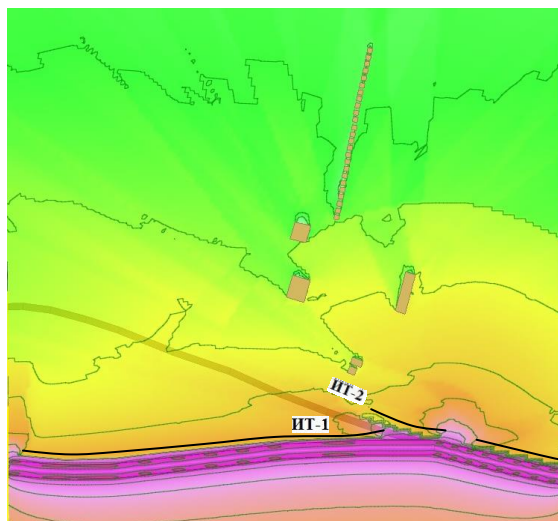
Рис.2 Максимальные уровни звука днем

а) без акустического экрана

б) с учетом акустического экрана



а)

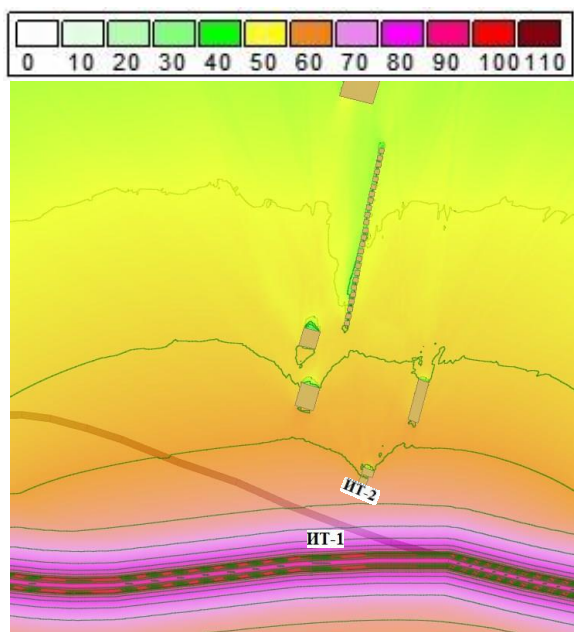


б)

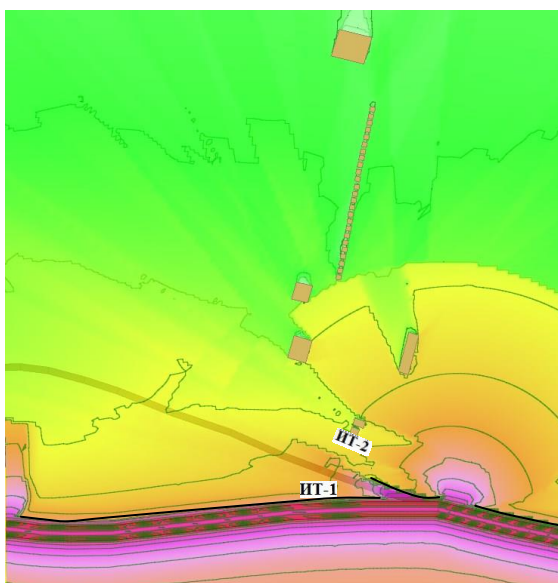
Рис.3 Максимальные уровни звука ночью

а) без акустического экрана

б) с учетом акустического экрана



а)

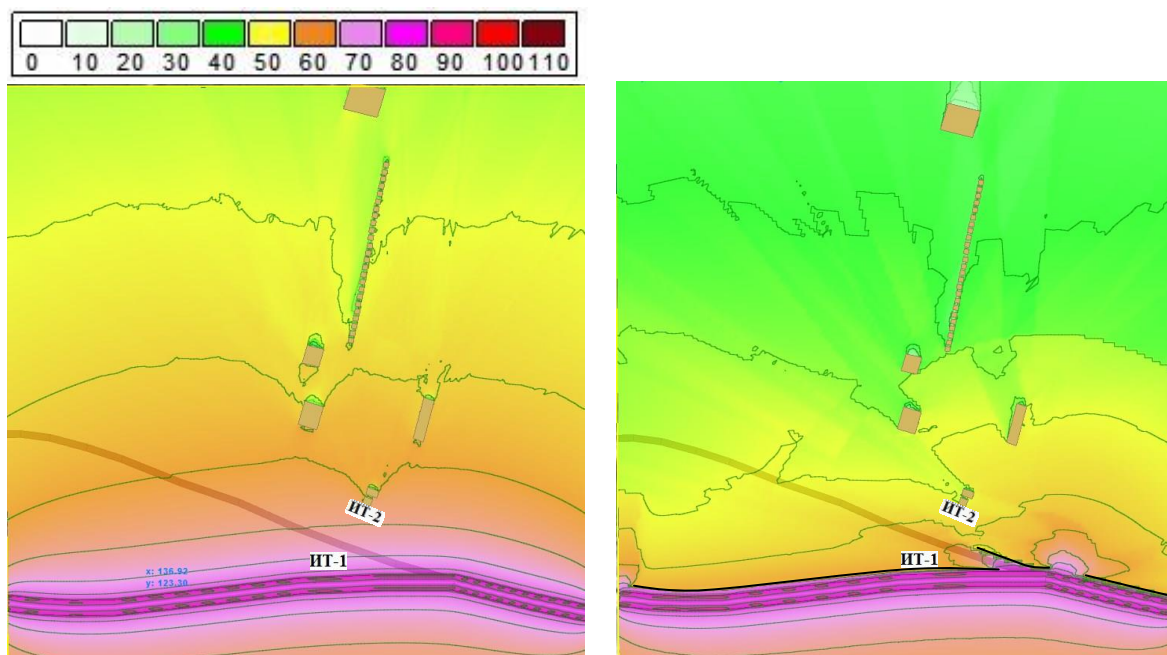


б)

Рис.4 Эквивалентные уровни звука днем

а) без акустического экрана;

б) с учетом акустического экрана



а) б)
 Рис.5 Эквивалентные уровни звука ночью
 а) без акустического экрана;
 б) с учетом акустического экрана;
 ИТ 1 – измерительная точка №1;
 ИТ 2 – измерительная точка №2.

Анализ результатов моделирования позволили выбрать необходимые параметры шумозащитных экранов. Для построения модели был принят тонкий акустический экран, с максимальным уровнем снижения равным 20 дБА по ГОСТ 31295-2005. Высота экранов составляет 3 м. Протяженность первого экрана составляет 390 м, второго экрана – 120 м, протяженность контр-экрана 90 м. Установка вышеуказанных экранов позволит снизить уровни шума на территории спортивно-оздоровительной базы до требований санитарных норм.

Заключение

В результате натурных измерений на территории спортивно - оздоровительной базы было выявлено, что эквивалентные и максимальные уровни звука составляют 59 дБА и 65 дБА днем, 61 дБА и 66 дБА ночью соответственно. Таким образом, имеется превышение эквивалентного уровня звука на 4 дБА в дневное время и на 16 дБА в ночное время. Превышение по максимальному уровню звука для ночного времени составляет 6 дБА. По результатам моделирования шумовой нагрузки в программном комплексе «АРМ-Акустика» в качестве средства шумозащиты были выбраны акустические экраны с расчетным обоснованием их параметров. Как показано на рис. 2-5 (б) рекомендуется установка акустического экрана в непосредственной близости от источника шума в пределах 2-4 м от автомагистрали. Общая протяжённость экранов по расчёту составит 600 м, из них первый – 390 м, второй – 120 м и контр-экран – 90 м, рекомендуемая высота экранов составляет 3 м. Максимальный уровень снижения экрана равен 20 дБА, исходя из требований

ГОСТ 31295-2005. Такое средство шумозащиты обеспечит снижение уровней шума на территории спортивно-оздоровительной базы до требования СН 2.2.4/2.1.8.562-96.

Список литературы

1. Иванов Н.И. - Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник, 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Логос, 2015. – 432 с.
2. Иванов Н.И., Куклин Д.А., Минина Н.Н.// Теоретические исследования процесса распространения звука в свободном пространстве от линейных источников Интеллектуальные системы в производстве. Научно-практический журнал. Ижевск.: ФГБОУ ВПО "Иж. гос. техн. ун-т им. М.Т. Калашникова", ISSN 2410-9304, 2015. – №2(26). с. 15-17.
3. Елунина А.Д., Ли-Ко-Шин Ю.А. Оценка эффективности акустических экранов при защите от шума железнодорожного транспорта БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова// V Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием стр. 656-664.