ТЕПЛОВЛАГОАКУСТИЧЕСКОЕ ПРОСЛУШИВАНИЕ ВОЛН В ОБОЛОЧКЕ ЗДАНИЙ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оболочка, затухание колебаний, аналогия, прослушивание, урбанизированная среда

С. В. Корниенко, доктор техн. наук, советник РААСН, ведущий научный сотрудник НИЦ ГП ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России», заведующий кафедрой «Архитектура зданий и сооружений» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

При достижении целей создания и поддержания комфортной среды обитания человека в зданиях одной из важнейших задач является выбор наружных ограждающих конструкций с учетом внешних климатических и антропогенных факторов городской среды. Колебания температуры, влажности и звукового давления, образующиеся на поверхности оболочки, проникают в ее толщу, влияя на защитные свойства ограждающих конструкций. Прогнозная оценка такого влияния позволит на практике соответствовать концепции ESG в строительстве. Предлагаем новый подход к оценке затухания волн различной природы в оболочке зданий на основе тепловлагозвуковой аналогии.

Урбанизированная среда характеризуется сложными волновыми воздействиями.

Во-первых, высокий уровень шума негативно влияет на человека, вызывая сердечно-сосудистые заболевания [1] или диабет [2]. Городское планирование и оболочка здания являются ключевыми факторами защиты от шума в жилых помещениях. Во-вторых, помимо высокого акустического качества оболочка здания должна иметь высокий уровень теплозащиты для обеспечения комфортного состояния человека и экономии энергии [3]. Во многих случаях несущие стены зданий выполнены из камня, следовательно, главной задачей является оценка теплоустойчивости каменных стен

энергоэффективных зданий [4]. В-третьих, наряду с теплозащитой необходимо исключить переувлажнение материалов ограждающих конструкций. Колебания влажности воздуха могут вызвать периодическую конденсацию на поверхности и в толще ограждений, что влечет за собой потерю их эксплуатационных качеств [5, 6].

Колебания температуры, влажности и звукового давления, образующиеся на поверхности оболочки, проникают в ее толщу, при этом происходит постепенное затухание колебаний. Особенно заметно затухание волн в слое резких колебаний, поэтому необходимо правильно прогнозировать снижение амплитуды характеристик в этом слое.

Отсутствие системной оценки защитных свойств ограждающих конструкций затрудняет применение принципов ESG на практике [7, 8].

Используя тепловлагозвуковую аналогию, предлагаем новый подход к оценке затухания волн различной природы в оболочке зданий.

Модель затухания волн в ограждении

Затухание звукового давления является основным параметром, используемым для описания потерь энергии при распространении звука в материалах. Это вызвано главным образом вязкостью материала, вследствие чего звуковая энергия преобразуется в тепловую и рассеивается в материальных средах.

Рассмотрим плоскую волну, которая входит в однородную конструкцию толщиной dx с амплитудой $P(x)$ (рис.). Если затухание волны в слое конструкции отсутствует, то амплитуда колебаний остается неизменной, поэтому при выходе из этого слоя $P(x + dx) = P(x)$. В случае затухания амплитуда колебаний изменяется на величину dP при прохождении через слой, а на выходе $P(x + dx) = P(x) + dP$. Поскольку при прохождении через ограждение волна ослабевает, dP можно определить согласно уравнению (1) (см. Формулы).

Решение уравнения (1) позволяет рассчитать величину амплитуды $P(x)$ по формуле (2), которая показывает, что затухание акустической волны происходит по экспоненциальному закону. Данный закон экспериментально подтвержден для широкой группы вязкоупругих материалов, таких как полимеры, мягкие ткани и пористые материалы [9].

Уточненная математическая модель затухания звуковых колебаний в пластине в зависимости от частоты предложена Томасом Л. Сабо[1] [10].

Применяя акустический аппарат к тепловым и влажностным процессам, можно рассчитать затухание температурных и влажностных колебаний в конструкции.

Расчет затухания волн в ограждении

Определим коэффициент затухания:

• **звуковых колебаний.** В [9] показано, что коэффициент затухания звуковых колебаний в материале зависит от угловой частоты в виде формулы (3). Зависимость угловой частоты от линейной в диапазоне слышимого звука (от 20 Гц до 20 кГц) определяется по формуле (4);

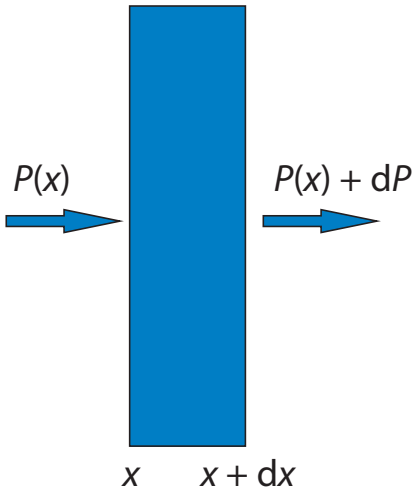

Рис. Схема изменения звукового давления за счет затухания в слое конструкции

• **температурных колебаний.** На основе решения одномерного уравнения теплопроводности для полуограниченного тела при граничном условии на поверхности тела в виде изменения температуры материала по закону гармонического колебания можно показать, что коэффициент затухания температурных колебаний связан с теплофизическими характеристиками материала и периодом колебаний температуры по формуле (5);

Формулы

Обозначение формулы	Формула
(1)	$dP = -\alpha P(x)dx$
(2)	$P(x) = P_0 exp(-\alpha x)$
(3)	$\alpha(\omega) = \alpha_0 \omega^{\eta}$
(4)	$\omega = 2\pi f$
(5)	$\alpha_T = \sqrt{\frac{\pi}{a_h z_T}}$
(6)	$\alpha_W = \sqrt{\frac{\pi}{a_m z_W}}$

Обозначения в формулах

P – амплитуда колебаний звукового давления, Па
α – коэффициент затухания звуковых колебаний в ограждении, м$^{-1}$
x – координата, м
P_0 – амплитуда колебаний звукового давления, Па, задаваемая источником при $x = 0$
ω – угловая частота, с$^{-1}$
α_0, η – параметры, определяемые из условия наилучшего приближения к экспериментальным данным
f – линейная частота, Гц
α_T – коэффициент затухания температурных колебаний, м$^{-1}$
a_h – коэффициент температуропроводности материала, м^2/с
z_T – период колебаний температуры или теплового потока, с
α_W – коэффициент затухания влажностных колебаний, м$^{-1}$
a_m – коэффициент потенциалопроводности материала, м^2/с
z_W – период колебаний влажности материала или потока влаги, с

[1] Томас Л. Сабо (Thomas L. Szabo) в настоящее время является членом Американского акустического общества и Американского института ультразвука в медицине.

Таблица Результаты расчета затухания волн в ограждающей конструкции

Вид волны	Коэффициент затухания α, м$^{-1}$	Кратность затухания колебаний		Толщина слоя резких колебаний, м
		в условном слое толщиной 100 мм	в слое резких колебаний	
Акустическая	1,66	1,18	5	0,970
Тепловая	9,39	2,56	2	0,074
Влажностная	44,60	86,50	100	0,103

• **влажностных колебаний.** Как видно из формулы (6), коэффициент затухания влажностных колебаний связан с влагофизическими характеристиками материала и периодом колебаний влажности материала.

Слой резких колебаний представляет собой слой конструкции со стороны волнового воздействия, в пределах которого амплитуда колебаний уменьшается в заданное число раз. В [11] предложено такое затухание амплитуды называть кратностью затухания колебаний. Следует различать кратности затухания тепловых, влажностных и акустических волновых процессов в ограждениях. В первом приближении можно принять следующую кратность затухания:

• для акустических колебаний в слое резких колебаний равной 5;

• для температурных колебаний равной 2 согласно теории теплоустойчивости;

• для влажностных колебаний равной 100 [12].

Расчет затухания рассматриваемых видов волн выполним при следующих исходных данных:

• звуковая волна: f = 19 736 Гц; ω = 124 005 с$^{-1}$; α_0 = 1,34 ·10^{-5} с/м; η = 1 [9];

• тепловая волна: a_h = 4,12 ·10^{-7} м^2/с, z_T = 86 400 с;

• влажностная волна: a_m = 1,83 ·10^{-8} м^2/с; z_W = 86 400 с [11].

Результаты расчета представлены в табл.

Анализ результатов расчета

Анализ результатов прослушивания волн в оболочке зданий показывает следующее:

1. Минимальный коэффициент затухания (1,66 м$^{-1}$) отмечается для акустической волны. Кратность затухания акустических колебаний в условном слое толщиной 100 мм равна 1,18. Толщина слоя резких колебаний 0,97 м. Поэтому защита от шума может быть обеспечена либо путем применения акустически однородных ограждающих конструкций большой массы, либо акустически неоднородными (многослойными) ограждениями.

2. Коэффициент затухания температурной волны равен 9,39 м$^{-1}$. Кратность затухания тепловых колебаний в условном слое толщиной 100 мм повышается до 2,56. Толщина слоя резких колебаний 0,074 м. Именно в этом слое должны быть сосредоточены материалы с высокой теплоаккумулирующей способностью.

3. Максимальный коэффициент затухания (44,6 м$^{-1}$) отмечается для влажностной волны. Кратность затухания влажностных колебаний в условном слое толщиной 100 мм равна 86,5. Толщина слоя резких колебаний 0,103 м. Важно обратить особое внимание на влагозащитные свойства материалов, расположенных в этом слое.

Предложенный новый подход является научной основой прогнозирования тепло-, влаго- и звукоизоляционных характеристик оболочки зданий при сложных волновых воздействиях в урбанизированной среде.

Литература

1. Babisch W. Updated Exposure-response Relationship between Road Traffic Noise and Coronary Heart Diseases: A Meta-analysis // Noise and Health. 2014. No. 16 (68). Pp. 1–9.

2. Gozalo G. R., Morillas J. M. B., Escobar V. G. Urban Streets Functionality as a Tool for Urban Pollution // Management, Science of the Total Environment. 2013. No. 461. Pp. 453–461.

3. Табунщиков Ю. А. Экология среды обитания человека: реальность, которую игнорировать бесконечно опасно // АВОК. 2023. № 3. С. 4–15.

4. Корниенко С. В., Горшков Р. А. Теплотехнические риски при решении задач сохранения каменных стен памятников архитектуры // Энергосбережение. 2024. № 3. С. 38–41.

5. Корниенко С. В. Характеристики состояния влаги в материалах ограждающих конструкций зданий // Строительные материалы. 2007. № 4. С. 74–78.

6. Влияние типа наружного штукатурного покрытия на температурно-влажностные характеристики однородных каменных стен / Н. Н. Шангина, А. М. Харитонов, С. В. Корниенко, В. Я. Ольшевский, А. И. Еникеев, С. Н. Фомин, А. С. Горшков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. Вып. 1(98). С. 407–417.

7. Бродач М. М., Шилкин Н. В. Принципы ESG в строительстве: Создание устойчивой, экологически ответственной и социально ориентированной среды обитания // Энергосбережение. 2025. № 2. С. 4–6.

8. Корниенко С. В. Повышение устойчивости городов на основе ESG-принципов // Энергосбережение. 2025. № 4. С. 18–21.

9. Fiala L., Cerný R. Theoretical approach to determination of acoustic properties of building materials / Resilient Structures and Sustainable Construction, 2016.

10. Szabo T. L. Time-domain Wave-equations for Lossy Media Obeying a Frequency Power-law // Journal of the Acoustical Society of America. 1994. No. 96 (1). Pp. 491–500.

11. Корниенко С. В. О возможности регулирования влажности воздуха в помещениях за счет правильного выбора строительных материалов и конструкций // Энергосбережение. 2025. № 1. С. 44–47.

12. Rode C., Peuhkuri R. The concept of moisture buffer value of building materials and its application in building design // Healthy Buildings: Creating a Healthy Indoor Environment for People, Proceedings OUR. 2006. Vol. 3. P. 6. ■

INTERLIGHT SMART CITY & HOME

30 ЛЕТ!

Международная выставка освещения, автоматизации зданий, электротехники и систем безопасности

21–24 октября 2025

Крокус Экспо, Москва

НОВОЕ НАЗВАНИЕ | НОВЫЕ ДАТЫ | НОВАЯ ЛОКАЦИЯ | НОВЫЕ ВПЕЧАТЛЕНИЯ

Сделано в России

→ Технологические решения в разделе SMART CITY & HOME

→ Ваши партнеры 450+ экспонентов

→ Деловая программа

- Конференции, лекции, панельные дискуссии с участием мировых экспертов
- Выступления представителей региональных и муниципальных властей
- Эксклюзивный деловой завтрак с девелоперами
- Практические мастер-классы для архитекторов, дизайнеров, светодизайнеров, интеграторов и электромонтажников
- Тематические туры по выставке для девелоперов, архитекторов, дизайнеров и электромонтажников

→ Аудитория 24 000+ посетителей

Получите бесплатный билет по промокоду **IL25-NZWZI**

Реклама

GEFERA MEDIA

interlight-building.ru | interlight@gefera.ru | +7 495 649 87 75