

УДК 69.059.032

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПЕРМАНЕНТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК
НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И
ДОЛГОВЕЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО
НАСЛЕДИЯ**

Гречишкин Александр Викторович,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г.Пенза,*

*кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Городское
строительство и архитектура»*

Гарькина Валерия Александровна,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г.Пенза,*

студент.

Аннотация

Анализируется проблема воздействия внешнего акустического шума, генерируемого городской средой, на конструкции объектов культурного наследия. Предложена комплексная методология оценки данного воздействия, сочетающая натурные измерения уровней звукового давления и вибрационного отклика конструкций с численным моделированием методом конечных элементов. В рамках исследования анализируется механизм трансформации акустической энергии в механические напряжения и деформации в материалах исторических зданий. Представлен математический пример расчета кумулятивного усталостного повреждения для элемента конструкции под воздействием типовой транспортной шумовой нагрузки. Методология позволяет прогнозировать развитие деградационных процессов и обосновывать

необходимость применения защитных мероприятий для сохранения уникальных памятников архитектуры.

Ключевые слова: звукоизоляция, объекты культурного наследия, теория ограничений, акустическое проектирование, реставрация, неразрушающий контроль, охранный статус, оптимизация.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF PERMANENT ACOUSTIC LOADS ON THE STRESS-STRAIN STATE AND DURABILITY OF STRUCTURES OF CULTURAL HERITAGE SITES

Alexander Viktorovich Grechishkin,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of
Urban Construction and Architecture*

Valeria Aleksandrovna Gar'kina,

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,
student.*

Abstract

This article analyzes the impact of external acoustic noise generated by the urban environment on the structures of cultural heritage sites. A comprehensive methodology for assessing this impact is proposed, combining in-kind measurements of sound pressure levels and structural vibration responses with numerical modeling using the finite element method. The study analyzes the mechanism by which acoustic energy is transformed into mechanical stresses and strains in the materials of historic buildings. A mathematical example of calculating cumulative fatigue damage to a structural element under the influence of typical traffic noise loads is presented. The methodology enables prediction of degradation processes and justification of the need for protective measures to preserve unique architectural monuments.

Keywords: soundproofing, cultural heritage sites, theory of constraints, acoustic design, restoration, non-destructive testing, conservation status, optimization.

Объекты культурного наследия (ОКН) представляют собой уникальный и невозполнимый ресурс, хранящий в себе материальное отражение исторического развития общества и культуры. Сохранение их физического состояния является одной из ключевых задач современного научного сообщества и государственных институтов, поскольку утрата ОКН означает безвозвратную потерю значимых страниц исторической памяти человечества. В условиях интенсификации урбанизации, увеличения транспортных потоков, а также повышения строительной активности вблизи исторических центров и памятников, возникает комплекс новых факторов риска, оказывающих неблагоприятное воздействие на сохранность этих объектов [1,2].

Одним из таких факторов, требующих пристального внимания, становится постоянное шумовое (акустическое) воздействие, источником которого служит как транспортная инфраструктура (железные дороги, автомобильные магистрали, метро), так и работы по капитальному строительству и реконструкции. Особую опасность для сохранности ОКН представляют низкочастотные звуковые волны, являющиеся колебаниями давления воздуха, способными инициировать динамические нагрузки на строительные элементы зданий.

Для современных сооружений, возведённых с применением железобетона, конструкционной стали и иных современных материалов, подобные воздействия, как правило, не представляют существенной угрозы за счёт высокой прочности и устойчивости к деформациям. В противоположность этому, исторические здания, выполненные из традиционных материалов — кирпича, натурального камня на известковых растворах, деревянного сруба и прочих, — отличаются повышенной уязвимостью по отношению к микровибрационным воздействиям [3]. Это обусловлено как особенностями используемых строительных материалов, так и наличием накопленных во времени структурных дефектов: микротрещин, зон

расслоения, слабых связей в кладке и т.д. В подобных конструкциях даже малозаметные вибрационные воздействия способны привести к инициированию и ускорению процессов физической и механической деградации, появлению и развитию трещин, расслоению отделочных и декоративных слоёв, снижению эксплуатационной надёжности и несущей способности элементов памятника в целом.

Ввиду изложенного, проблема обеспечения рациональной защиты объектов культурного наследия от акустического влияния приобретает актуальность не только в инженерно-техническом, но и в широком социо-культурном контексте [4,5]. Возникает необходимость разработки и внедрения научно обоснованных подходов и методик для количественной оценки рисков, связанных с шумовым воздействием на исторические здания и сооружения. Такие методики должны учитывать как акустические характеристики среды, так и физико-механические свойства старинных конструкций, тем самым обеспечивая основу для принятия эффективных решений в области их сохранения и реставрации. Всё вышеизложенное определяет актуальность, научную и практическую значимость настоящего исследования.

Основная научная проблема заключается в отсутствии унифицированной и всесторонней методологии, позволяющей установить однозначную и количественно выраженную зависимость между параметрами внешнего акустического воздействия (уровень звукового давления, спектральный состав и другие характеристики акустических волн) и скоростью накопления повреждений в материалах и конструктивных элементах объекта культурного наследия (ОКН). Существующие на сегодняшний день подходы, как правило, ограничиваются либо констатацией факта превышения санитарно-гигиенических нормативов уровня шума, либо проведением визуального обследования конструкций с целью фиксации последствий разрушения без глубокого анализа механизмов повреждения и причинно-следственных связей между акустическим воздействием и снижением эксплуатационных характеристик исторических

материалов. Таким образом, отсутствует методологическая основа для оценки физико-механических последствий акустических нагрузок, способных приводить к деградации и потере несущей способности уникальных объектов культурного наследия.

В связи с этим необходимо решение следующих научно-технических задач:

Во-первых, требуется разработка алгоритма комплексного многоуровневого мониторинга, предусматривающего проведение синхронных измерений параметров акустического поля в непосредственной близости от исследуемого объекта, а также регистрацию вибрационных характеристик отдельных элементов строительных конструкций в реальном или квазиреальном времени. Такой подход позволит сформировать репрезентативный массив исходных данных для валидации математических моделей.

Во-вторых, необходимо создание и экспериментальная верификация методики построения численных моделей (в том числе, на основе метода конечных элементов), способных адекватно воспроизводить динамический отклик конструкций ОКН на воздействие акустических волн различной интенсивности и частотного диапазона. Для этого потребуется интеграция эмпирических данных с результатами численного моделирования, что даст возможность формализовать критерии повреждаемости и накапливаемых деформаций.

В-третьих, требуется адаптация современных моделей механики разрушения и теории усталости материалов к специфике исторических строительных материалов, таких как каменная кладка, известковый раствор и штукатурка, находящихся в условиях малоцикловых вибрационных нагрузок с возможными проявлениями микроповреждений и деградации межфасадных связей. Особое внимание должно быть уделено уточнению параметров прочности и долговечности с учетом возрастных изменений и неоднородности структуры материалов.

Наконец, необходимо сформулировать инженерно обоснованные критерии допустимого акустического воздействия на объекты культурного наследия [6], основанные не только на санитарно-гигиенических, но и на физико-механических и конструктивных показателях сохранности, позволяющих оценивать предельно допустимый уровень и характер внешней акустической нагрузки с точки зрения обеспечения долговечности и прочности исторических сооружений.

Реализация данных задач обеспечит научное обоснование новых методов мониторинга, диагностики и прогноза состояния объектов культурного наследия, позволит разработать практические рекомендации по безопасной эксплуатации и сохранению уникальных архитектурных памятников в современных урбанизированных условиях [7,8].

Для достижения поставленных задач предусмотрена реализация комплексной научно-обоснованной методики, включающей последовательное выполнение четырех ключевых этапов.

Этап 1. Проведение натурных акусто-вибрационных измерений. На первом этапе осуществляется систематический и длительный мониторинг акустической среды в непосредственной близости к исследуемому объекту. Для получения высокоточных данных используются калиброванные шумомеры первого класса точности, способные регистрировать эквивалентные и максимальные значения уровней звукового давления в октавных или третьоктавных полосах частот в интервале от 20 до 250 Гц. Особое внимание при этом уделяется низкочастотному диапазону, поскольку его воздействие может провоцировать возникновение резонансных явлений в массивных строительных конструкциях различного типа (стены, своды, перекрытия). Для комплексной оценки динамического воздействия на важнейших конструктивных элементах объекта устанавливаются высокочувствительные акселерометры, позволяющие проводить регистрацию параметров вибрации, таких как виброускорения и виброскорости, с расширенным динамическим диапазоном. Проводится одновременно учет воздействия акустических и вибрационных нагрузок с учетом временных и

частотных характеристик [9], что обеспечивает максимальную достоверность исходных данных для последующего моделирования.

Этап 2. Построение и настройка конечно-элементной модели (КЭМ). На данном этапе формируется детализированная пространственная конечно-элементная модель исследуемого объекта либо его наиболее уязвимой части, обладающей характерными признаками пониженной виброустойчивости. Осуществляется задание физических и механических характеристик материалов, составляющих конструкцию: модуля упругости, плотности, коэффициента Пуассона и других параметров, определяемых в ходе натурных обследований либо взятых из нормативных и справочных источников. Особое значение придается корректной оценке коэффициентов демпфирования, определяющих способность материалов рассеивать энергию поступающих механических колебаний, что критически важно для последующего достоверного расчета напряженно-деформированного состояния (НДС). Воздействие акустической нагрузки, зафиксированной в рамках первого этапа, моделируется в виде переменного внешнего давления, прикладываемого к поверхностям КЭМ согласно установленному пространственному и частотному распределению.

Этап 3. Верификация модели и анализ напряженно-деформированного состояния конструкций. На третьем этапе реализуются гармонический и/или динамический анализы созданной конечно-элементной модели. Результаты моделирования, в первую очередь амплитудные значения виброускорений (либо других динамических характеристик) в контрольных точках конструкции, сопоставляются с соответствующими экспериментальными данными, полученными с акселерометров на реальном объекте. В случае достижения удовлетворительной степени сходимости расчетных и экспериментальных данных (расхождение не превышает 15–20%) модель считается достоверно верифицированной для дальнейшего использования. С помощью верифицированной модели осуществляется расчет распределения полей напряжений и деформаций по объему конструкций с целью выявления участков

с максимальной концентрацией динамических напряжений и потенциальных зон риска.

Этап 4. Прогнозирование усталостной долговечности конструктивных элементов. Для участков, характеризующихся наибольшими значениями циклических напряжений, проводится оценка накопления усталостных повреждений на основе общепринятых критериев прочности и долговечности. Ключевую роль играет применение гипотезы линейного суммирования повреждений Пальмгрена-Майнера, позволяющей количественно оценить степень исчерпания ресурса материала под действием переменных нагрузок. Совокупное усталостное повреждение рассчитывается по формуле:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i}$$

где n_i — число циклов нагружения с определённой амплитудой напряжения σ_i за анализируемый временной период, а N_i — число циклов до наступления разрушения при той же амплитуде, определяемое на основе экспериментально построенных кривых усталости материала (кривых Веллера или S-N кривых). Достижение значения $D=1$ служит прогностическим критерием вероятного наступления отказа конструкции по усталостной прочности. Проведённая оценка позволяет не только выявить уязвимые зоны, но и прогнозировать сроки безотказной эксплуатации конструкций при текущем режиме воздействующих нагрузок, что является основой для формирования рекомендаций по их эксплуатации, укреплению либо проведению профилактических работ.

Рассмотрим количественную оценку воздействия акустической нагрузки, создаваемой проезжающим тяжелым грузовым автомобилем, на фрагмент стены, выполненной из исторической кирпичной кладки. Проведём последовательный анализ, включающий пересчёт параметров звукового давления в эквивалентные механические напряжения, а также оценку усталостного износа материала под действием циклических нагрузок.

Исходные параметры задачи: максимальный уровень звукового давления на фасаде здания составляет $L_{p_{\max}}=94$ дБ, доминирующая частота воздействия $f=80$ Гц, длительность одного события воздействия $t=5$ с, среднее количество воздействий в сутки $k=200$

1. Перевод уровней звукового давления в абсолютные значения:

Для получения амплитудного значения звукового давления используем стандартное соотношение:

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{P_{rms}}{P_{ref}} \right),$$

где $P_{ref}=2 \cdot 10^{-5}$ Па — опорное (пороговое) значение звукового давления.

Тогда:

$$P_{rms} = P_{ref} \cdot 10^{L_p/20} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{94/20} \approx 1 \text{ Па}.$$

Амплитудное (максимальное) значение давления вычисляется как:

$$P_0 = P_{rms} \sqrt{2} \approx 1,41 \text{ Па}$$

2. Определение отвечающих механических напряжений в кирпичной кладке:

Верифицированная численная модель методом конечных элементов показывает, что при амплитуде воздействия $P_0=1,41$ Па и частоте 80 Гц в наиболее уязвимой области кладки с существующими трещинами возникают циклические напряжения растяжения–сжатия амплитудой $\sigma_a=0,012$ МПа

3. Оценка усталостной долговечности кладки:

Используем эмпирическую усталостную зависимость для исторической кирпичной кладки в виде уравнения:

$$m \log(\sigma_a) + \log(N) = C$$

где по справочным данным принимаются $m=8$ и $C=13$

Подставляя $\sigma_a=0,012$ Мпа получаем:

$$\log(N) = 13 - 8 \cdot \log(0,012) = 13 + 8 \cdot 1,9208 = 28,36 \quad N \approx 10^{28,36} \approx 2,3 \cdot 10^{28} \text{ циклов}$$

что на много порядков превышает ожидаемое число циклов нагрузки в условиях эксплуатации.

4. Расчет совокупного усталостного повреждения:

Оценим число циклов за одно воздействие:

$$n_{\text{single}} = f \cdot t = 80 \cdot 5 = 400 \text{ циклов.}$$

Общее число циклов нагрузки в сутки:

$$n_{\text{day}} = n_{\text{single}} \cdot k = 400 \cdot 200 = 80000 \text{ циклов.}$$

И, соответственно, в год:

$$n_{\text{year}} = n_{\text{day}} \cdot 365 = 2,92 \cdot 10^7 \text{ циклов.}$$

Относительное усталостное повреждение за год оценивается по критерию Минера:

$$D_{\text{year}} = \frac{n_{\text{year}}}{N} = \frac{2,92 \cdot 10^7}{2,3 \cdot 10^{28}} \approx 1,27 \cdot 10^{-21}$$

Эта величина указывает на пренебрежимо малый уровень усталостного повреждения в реальных условиях.

Если вследствие, например, резонансных явлений либо существенных дефектов кладки напряжения увеличиваются до $\sigma_a = 0,4$ МПа, то:

$$\log(N) = 13 - 8 \cdot \log(0,4) = 13 + 8 \cdot 0,39794 = 16,18$$

$$N \approx 1,51 \cdot 10^{16} \text{ циклов}$$

$$D_{\text{year}} = \frac{2,92 \cdot 10^7}{1,51 \cdot 10^{16}} \approx 1,93 \cdot 10^{-9}$$

Это всё равно крайне незначительная доля усталостного износа за год, и требуемое время до накопления критического повреждения измеряется миллионами лет.

Заключение:

Проведённый анализ показывает, что акустические воздействия от транспортных потоков, даже при довольно высоком уровне звукового давления, в большинстве случаев индуцируют в кирпичной кладке такие уровни напряжений, которые существенно ниже усталостного предела материалов. Кумулятивное повреждение за эксплуатационные периоды оказывается ничтожно малым. Однако, следует особо подчеркнуть, что критически важное

значение имеют возможные резонансные эффекты, при которых амплитуда вынужденных колебаний конструкции может возрасти в десятки или сотни раз относительно исходных значений. В случае совпадения резонансных частот системы и доминирующих акустических частот, реальное накопление усталостных повреждений может приобрести ощутимый характер уже в пределах сроков эксплуатации здания. Поэтому своевременное выявление собственных частот колебаний и возможных резонансных состояний конструкции является ключевой частью инженерного диагностического мониторинга и позволяет разработать меры по предотвращению ускоренного усталостного разрушения.

Библиографический список:

1. Мирхасанов Р.Ф., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н. От "чугунной архитектуры" к металлическому каркасу // Региональная архитектура и строительство. 2023. № 1 (54). С. 178-185
2. Антонов А.И., Гречишкин А.В., Гусев В.П., Леденев В.И., Матвеева И.В. Снижение шума газоздушных каналов энергетических предприятий звукоизолирующими облицовками// Приволжский научный журнал. 2022. № 1 (61). С. 97-103.
3. Гречишкин А.В., Жоголева О.А., Матвеева И.В. Учет фактора шумности при реконструкции исторической застройки провинциальных городов // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 2 (47). С. 145-150
4. Каракова Т.В., Данилова А.В. Художественная перфорация как инструмент формообразования архитектуры общественного здания в контексте эмерджентности системы // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 1 (46). С. 211-219
5. Кузин Н.Я., Багдоев С.Г. Оценка внешних факторов на несущую способность конструкций гражданских зданий // Региональная архитектура и строительство. 2012. №2 С.79-82

6. Лызина А.Г. Эволюция планировки бесстолпного и крестово-купольного типов православного храма XVIII - начала XX века на территории Пензенской области // Архитектон: известия вузов. 2015. № 3 (51). С. 18.

7. Гарькин И.Н. Историко-архитектурная ценность объектов культурного наследия: методика оценки, пофакторный и историко-генетический анализ // Региональная архитектура и строительство. 2025. № 1 (62). С. 192-199

8. Гарькин И.Н., Сабитов Л.С., Гайдук А.Р., Чиркина М.А. Сохранение архитектурных концепций малых населенных пунктов: консервация объектов культурного наследия Инженерный вестник Дона. 2022. № 11 (95).
<http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8017>

9. Шеин А.И., Зайцев М.Б. Анализ спектральных характеристик высотного здания в среде "MATLAB" // Моделирование и механика конструкций. 2024. № 19. С. 9-21