

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ОГРАНИЧЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ И ОПТИМИЗАЦИИ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ НА ОБЪЕКТАХ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

Гречишкин Александр Викторович,

*ФГБОУ ВО 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 оценки и повышения звукоизоляции ограждающих конструкций на объектах культурного наследия. Традиционные подходы, ориентированные на поиск и устранение акустически слабого звена, часто неприменимы из-за строгих ограничений, связанных с сохранением исторической и архитектурной ценности. Предлагается методологический подход, основанный на Теории Ограничений (ТОС), который позволяет переосмыслить систему "здание-акустическая среда". В рамках данного подхода основным ограничением системы выступает не конкретный конструктивный элемент, а сам охранный статус объекта, диктующий невозможность или крайнюю ограниченность инвазивных вмешательств. Приводится математическая модель для сравнения эффективности различных мероприятий с учетом не только акустического эффекта, но и степени воздействия на предмет охраны.

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

APPLICATION OF THE THEORY OF CONSTRAINTS TO EVALUATION AND OPTIMIZATION OF SOUNDPROOFING AT 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 problem of assessing and improving the sound insulation of building envelopes at cultural heritage sites. Traditional approaches focused on identifying and eliminating acoustic weaknesses are often inapplicable due to strict constraints associated with preserving historical and architectural value. A methodological approach based on the Theory of Constraints (TOC) is proposed, allowing for a rethinking of the "building-acoustic environment" system. Within this approach, the primary constraint of the system is not a specific structural element, but the protected status of the site itself, which dictates the impossibility or extreme limitations of invasive interventions. A mathematical model is presented for comparing the effectiveness of various measures, taking into account not only the acoustic effect but also the degree of impact on the protected object.

Keywords: sound insulation, cultural heritage objects, theory of constraints, acoustic design, restoration, non-destructive testing, conservation status, optimization.

Адаптация объектов культурного наследия (ОКН) к современному использованию представляет собой одну из приоритетных задач в области сохранения и популяризации историко-культурного наследия. Интеграция в исторические здания современных функциональных пространств — концертных залов, музеев с мультимедийными экспозициями, офисов и жилых апартаментов — обуславливает необходимость обеспечения нормативных или комфортных акустических характеристик. Вместе с тем достижение требуемых показателей звукоизоляции сопряжено с фундаментальным противоречием: традиционные методы акустической изоляции, доказавшие свою эффективность в современном строительстве (увеличение массы ограждающих конструкций, применение многослойных облицовок с разнесением слоёв, сплошная герметизация), зачастую оказываются неприемлемыми для исторических зданий, так как приводят к утрате аутентичных материалов, конструкций и архитектурных решений, входящих в предмет охраны.

В классической строительной акустике ограждающая конструкция рассматривается как система, акустическая эффективность которой (т.е. звукоизоляция) определяется характеристиками её наименее эффективного элемента. Такой подход обуславливает стремление к усилению либо замене данного конструктивного узла. Однако в условиях ОКН реализация подобных мероприятий, как правило, ограничена действующим законодательством в сфере сохранения наследия, а также этическими нормами реставрации [1,2].

Сложившаяся ситуация подчеркивает необходимость разработки нового теоретико-методологического аппарата, позволяющего обеспечивать требуемые акустические параметры при наличии жёстких и неустраняемых ограничений вмешательства в исходные конструкции. В данном контексте потенциальным инструментом может выступать теория ограничений (Theory of Constraints, ТОС), разработанная Элияху М. Голдраттом и зарекомендовавшая себя в качестве эффективной философии управления сложными системами.

Оценка и совершенствование звукоизоляционных характеристик объектов культурного наследия (ОКН) сопряжены с существенными методологическими

трудностями, обусловленными спецификой самих объектов и ограничениями, регламентированными их охранным статусом. Типовые методики акустической экспертизы, разработанные с учётом возможности последующего инженерного вмешательства в конструкцию здания, оказываются в таких условиях малоэффективными и даже нерелевантными [3,4]. Главная проблема заключается в том, что ключевые элементы, ответственные за недостаточный уровень звукоизоляции (например, оригинальные оконные заполнения, тонкостенные деревянные перекрытия или декоративные элементы, выступающие акустическими мостиками), зачастую также обладают высокой историко-культурной значимостью и входят в состав предмета охраны. Вмешательство в данные конструкции либо строго ограничено, либо недопустимо.

С позиций теории ограничений (ТОС), корректная постановка задачи требует сдвига внимания с конкретных конструктивных элементов (окна, перекрытия, стены), традиционно рассматриваемых в качестве "слабого звена" системы, на выявление истинного, системообразующего ограничения. В случае зданий-памятников таковым выступает не физическая характеристика ограждающих конструкций, а сам охранный статус объекта, определяющий совокупность норм и требований по недопустимости или существенному ограничению вмешательств в историческую материю [5]. Именно этот статус предопределяет критически низкую "пропускную способность" системы в части реализации стандартных акустических мероприятий и определяет предел эффективности достижимого улучшения акустического комфорта.

Следовательно, задача не может быть сформулирована в терминах преодоления или усиления конкретного слабого звена (например, модернизации окон или усиления перекрытий), как это принято в стандартных инженерных подходах. Напротив, она требует разработки и внедрения альтернативных решений, позволяющих достигнуть заданного уровня акустического комфорта при безусловном сохранении историко-культурной ценности [6]. Такой подход предусматривает глубокий междисциплинарный анализ возможностей

интеграции обратимых и нерутинных решений: организационно-функциональных, технологических и эксплуатационных мероприятий, минимально воздействующих на ценные элементы, но позволяющих компенсировать недостатки стандартных конструкций с учётом установленных охранных регламентов. Системность в данном контексте предполагает фокусировку на поиске баланса между требованиями по сохранению наследия и современными стандартами качества акустической среды, развитие новых критериев и алгоритмов оценки эффективности реализуемых решений.

Применение Теории Ограничений к поставленной задаче реализуется посредством последовательного осуществления пяти этапов, определяющих направленность управленческих решений.

На первом этапе осуществляется идентификация системного ограничения. Как установлено выше, основное ограничение обусловлено не физическим элементом, а нематериальным фактором — охранным статусом объекта и перечнем элементов предмета охраны [7]. Вторичные, подчинённые ограничения связаны с конкретными конструктивными элементами (исторические оконные и дверные блоки, настенные росписи), чья модификация не допускается в соответствии с требованиями по сохранению объекта культурного наследия.

Второй этап предполагает максимальное использование (эксплуатацию) выявленного ограничения. В данном контексте эксплуатация охрannого статуса выражается в работе исключительно в его пределах с максимальным использованием всех доступных нереставрационных, неинвазивных или обратимых методов [8,9]. На этом этапе осуществляется комплексное акустическое обследование с применением методов неразрушающего контроля, формируются компьютерные модели для выявления как прямых, так и косвенных путей передачи звука. К решениям могут относиться применение тяжёлых штор из специализированных акустических материалов, устройство вторых ниток остекления на самостоятельном каркасе, не затрагивающем исторические рамы, использование звукопоглощающих ковров и гобеленов, а

также акустическая обработка поверхностей, не обладающих статусом предмета охраны.

Третий этап требует подчинения всех последующих действий стратегическому решению, избранному на предыдущем этапе. Все проектные и инженерные мероприятия выстраиваются вокруг выбранной стратегии. Так, например, при выборе основной меры по снижению шума с улицы в виде установки дополнительной нитки остекления становится нецелесообразным инвестировать значительные ресурсы в дополнительную звукоизоляцию капитальной стены, ввиду ее минимального вклада в общую звукопроницаемость фасада. Тем самым, ресурсы (финансовые, временные, трудовые) фокусируются на мероприятиях, непосредственно совместимых с установленным ограничением.

Четвертый этап связан с расширением (элевированием) ограничения системы. На этом этапе ведется поиск и реализуются возможности их устранения или смягчения. В отношении объектов культурного наследия это не означает отмену охранного статуса, а подразумевает создание и внедрение высокотехнологичных решений, позволяющих достигать требуемых акустических характеристик с соблюдением принципов реставрации. К примеру, могут быть разработаны прозрачные виброгасящие пленки для нанесения на историческое остекление (при условии допустимости такого вмешательства), инновационные сверхтонкие звукоизоляционные мембраны, интегрируемые в конструкцию пола без изменения его уровня и нагрузки, а также системы активного шумоподавления для компенсации низкочастотных шумов. Элевирование ограничения — сфера научных исследований и высокотехнологичной разработки.

Пятый этап заключается в возвращении к первому шагу в случае, если в результате предпринятых мер имеющееся ограничение утрачивает свою значимость. Например, согласование и внедрение технологии эффективной звукоизоляции исторических окон может привести к появлению нового акустического ограничения, которым становится косвенная передача звука через

сопряженные конструкции. В этом случае цикл анализа повторяется, акцентируя внимание на новом «слабом звене», при этом постоянным приоритетом остается соблюдение принципов сохранения наследия.

Для обоснования выбора оптимального технического решения по повышению звукоизоляции исторических оконных конструкций предлагается использовать Интегральный Показатель Эффективности (ИПЭ). Данный показатель комплексно учитывает как акустический выигрыш от внедрения той или иной меры, так и степень инвазивности воздействия на объект культурного наследия.

ИПЭ определяется по следующей формуле:

$$\text{ИПЭ} = k_1 \cdot \Delta R - k_2 \cdot I$$

где:

ΔR — прирост индекса изоляции воздушного шума, измеряемый в децибелах (дБ);

I — индекс инвазивности, являющийся безразмерной величиной, устанавливаемой экспертным путём по шкале от 0 до 10, где 0 соответствует полностью обратимым вмешательствам, не затрагивающим предмет охраны, а 10 — необратимому повреждению или утрате аутентичного элемента;

k_1 — весовой коэффициент, отражающий значимость достижения акустического эффекта;

k_2 — весовой коэффициент, отражающий значимость сохранения аутентичности объекта. Следует подчеркнуть, что для объектов культурного наследия k_2 должен существенно превышать k_1 , что обусловлено приоритетом сохранения исторической ценности перед эксплуатационными улучшениями.

Рассмотрим применение данного подхода на конкретном примере — модернизация исторического деревянного окна с начальными звукоизоляционными характеристиками $R_w=20$ дБ.

Примем $k_1=1$, $k_2=5$

Вариант 1. Замена исторического окна на современный стеклопакет, воссоздающий внешний облик оригинала. Прирост звукоизоляции составит

$\Delta R=15$ дБ (R_w возрастает до 35 дБ). Однако вмешательство сопровождается полной утратой подлинного оконного заполнения, что оценивается индексом инвазивности $I=9$. В этом случае:

$$\text{ИПЭ}_1=1\cdot15-5\cdot9=15-45=-30$$

Отрицательное значение ИПЭ свидетельствует о недопустимости подобного варианта, так как ущерб, нанесённый исторической субстанции, значительно превышает достигнутый акустический эффект.

Вариант 2. Монтаж дополнительного ряда остекления в отдельной раме без вмешательства в аутентичную конструкцию. Прирост звукоизоляции в данном случае составляет $\Delta R=12$ дБ ($R_w=32$), вмешательство полностью обратимо ($I=1$):

$$\text{ИПЭ}_2=1\cdot12-5\cdot1=12-5=7$$

Положительное значение ИПЭ указывает на приемлемость данного решения, при котором обеспечивается значительный акустический выигрыш при минимальном воздействии на предмет охраны.

Вариант 3. Применение тяжёлых акустических штор. В этом случае прирост звукоизоляции составляет $\Delta R=5$ дБ ($R_w=25R_w = 25R_w=25$ дБ), а вмешательство отсутствует ($I=0$):

$$\text{ИПЭ}_3=1\cdot5-5\cdot0=5$$

Данное решение характеризуется полной сохранностью исторических окон и крайне низкой инвазивностью, однако обеспечивает относительно скромное повышение звукоизоляции.

Использование Интегрального Показателя Эффективности позволяет объективно сравнивать альтернативные меры по улучшению звукоизолирующих характеристик исторических оконных конструкций, обеспечивая баланс между требованиями по сохранению историко-культурной ценности и необходимыми эксплуатационными улучшениями. Такой подход способствует формированию обоснованных управленческих решений при реставрации и приспособлении объектов культурного наследия.

Выводы и рекомендации

Применение Теории ограничений обеспечивает системный и структурированный подход к решению сложной междисциплинарной задачи звукоизоляции на объектах культурного наследия. Данный подход акцентирует внимание не на локализации и устранении отдельных технических узких мест, а на управлении ключевым системным ограничением — необходимостью сохранения аутентичности исторического объекта при реализации акустических мероприятий.

Формирование проектных коллективов с участием специалистов в области акустики, реставрации, архитектурной истории и конструкторских решений рекомендуется осуществлять начиная с ранних этапов предпроектных исследований с целью обеспечения комплексного и сбалансированного учёта всех аспектов сохранения и адаптации объекта.

Целесообразно внедрение математических методов моделирования акустических процессов, позволяющих прогнозировать эффективность неинвазивных акустических решений и минимизировать объём опытных работ непосредственно на объекте культурного наследия.

Необходимо разработать и интегрировать в проектную деятельность методику оценки эффективности проектных вмешательств, основанную на Интегральном показателе эффективности, который отражает как технические, так и ценностные (культурно-исторические) характеристики объекта.

Важно стимулировать научно-исследовательские работы, направленные на разработку новых обратимых и/или малозаметных материалов и инженерных систем, позволяющих повысить акустические свойства пространств при одновременном сохранении их историко-культурной ценности.

Предложенный методологический подход целесообразно использовать в качестве концептуальной основы для последующей разработки нормативных документов и методических рекомендаций по акустическому проектированию в процессе реставрации и адаптации объектов культурного наследия.

Библиографический список:

1. Антонов А.И., Гречишкин А.В., Гусев В.П., Леденев В.И., Матвеева И.В. Снижение шума газовоздушных каналов энергетических предприятий звукоизолирующими облицовками// Приволжский научный журнал. 2022. № 1 (61). С. 97-103.
2. 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
3. Гарькин И.Н. Математическая модель применения риск ориентированного подхода при ремонте сложной кровли объектов культурного наследия // Системные технологии. 2025. № 2 (55). С. 92-97
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. Мирхасанов Р.Ф., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н. Композиционная форма в архитектуре конца XIX века: эволюция инженерной мысли // Региональная архитектура и строительство. 2023. № 2 (55). С. 157-161.
9. Шеин А.И., Зайцев М.Б. Анализ спектральных характеристик высотного здания в среде "MATLAB" // Моделирование и механика конструкций. 2024. № 19. С. 9-21