Совершенствование конструктивных решений наружных ограждающих конструкций для повышения акустического комфорта многоквартирных жилых зданий в условиях плотной городской застройки

Маркич Анна Александровна
магистрант, направление подготовки 08.04.01 «Строительство», Московский гуманитарно-технологический университет – Московский архитектурно-строительный институт, a.goroshko1980@gmail.com,

Громыко Александр Николаевич
кандидат технических наук, доцент, Московский гуманитарно-технологический университет – Московский архитектурно-строительный институт, Grelix7@yandex.ru

В статье рассматриваются вопросы повышения акустического комфорта многоквартирных жилых зданий, расположенных в условиях интенсивного транспортного шумового воздействия. Цель исследования состоит в оценке эффективности комплексной модернизации наружных ограждающих конструкций на примере монолитно-каркасного жилого здания в плотной городской застройке. Методология включает расчёт приведённой звукоизоляции составного фасада с учётом площадей глухих и светопрозрачных участков, сравнение четырёх конструктивных вариантов и анализ вклада отдельных элементов акустической оболочки. Рассмотрены штукатурная фасадная система, навесной вентилируемый фасад, стандартные и акустические оконные блоки, трёхслойный монтажный шов, шумозащищённая приточная вентиляция и локальная звукопоглощающая обработка фасадного выступа. Установлено, что замена только глухой части фасада даёт ограниченный прирост 0,2 дБ вследствие доминирующего влияния оконных конструкций. Применение акустических окон повышает приведённую звукоизоляцию до 42,4-42,7 дБ, а комплексный вариант – до 43,4-43,8 дБ. Полученный прирост 7,5-7,6 дБ соответствует снижению проникающей звуковой энергии более чем на 80%. Результаты могут использоваться при проектировании новых и реконструкции существующих многоквартирных жилых зданий, расположенных вблизи городских магистралей.

Ключевые слова: строительная акустика, звукоизоляция, транспортный шум, наружные ограждающие конструкции, навесной вентилируемый фасад, акустический стеклопакет, монтажный шов, акустический комфорт.

Введение

В последние десятилетия проблема шумового загрязнения городской среды приобрела особую актуальность вследствие роста автомобилизации, увеличения интенсивности транспортных потоков и уплотнения городской застройки. Транспортный шум относится к основным факторам, определяющим качество внутренней среды жилых зданий. Длительное воздействие повышенных уровней шума связано со снижением качества сна, ухудшением концентрации внимания, хроническим стрессом и дополнительными рисками для здоровья населения [1, с. 15-19].

Одним из наиболее эффективных способов ограничения внешнего шумового воздействия является повышение звукоизоляционной способности наружных ограждающих конструкций. Однако достижение требуемых показателей невозможно обеспечить исключительно увеличением толщины или массы стены. Результирующая звукоизоляция фасада определяется совместной работой глухой части, светопрозрачных конструкций, монтажных швов, вентиляционных устройств и узлов сопряжения [2, с. 104-112; 3, с. 237-245].

Особую сложность представляет проектирование зданий вдоль магистральных улиц, где фасады одновременно воспринимают прямые, отражённые и дифрагированные звуковые волны. При существенной площади остекления именно оконные блоки и их монтажные примыкания нередко становятся определяющими путями передачи звука. Поэтому модернизация только массивной части стены может не приводить к заметному изменению акустических характеристик помещения [4, с. 373-385].

В отечественной практике защита зданий от шума регламентируется СП 51.13330.2011, а методы измерения звукоизоляции ГОСТ 27296-2012 [5, с. 1-46; 6, с. 1-34]. Международная расчётная практика основана, в частности, на ISO 717-1 и ISO 12354-3, предусматривающих оценку звукоизоляции строительных элементов и наружных ограждений от внешнего шума [7, с. 1-28; 8, с. 1-44]. Современные исследования также рассматривают шумозащи-щённые окна, фасадные системы и вентилируемые акустические устройства как взаимосвязанные элементы оболочки здания [9, с. 1–24; 10, с. 1–13].

Целью настоящей работы является оценка эффективности комплексной модернизации наружных ограждающих конструкций многоквартирного жилого здания для повышения акустического комфорта помещений в условиях интенсивного транспортного шумового воздействия. Для достижения цели сопоставлены четыре конструктивных варианта и определён вклад глухой части фасада и оконных блоков в результирующую звукоизоляцию.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является многоквартирный жилой дом монолитно-каркасной конструктивной схемы, расположенный в плотной городской застройке города Донецка. Для расчётного анализа выбрана угловая двухкомнатная квартира № 42 на седьмом этаже, наружные стены которой ориентированы в сторону улицы Университетской и проспекта Панфилова. Расстояние до улицы Университетской составляет около 119 м; улица имеет четыре полосы движения. Между магистралью и жилым домом находится четырёхэтажное кирпичное здание колледжа, частично экранирующее нижние этажи. Квартира расположена выше основной зоны экранирования, а со стороны проспекта Панфилова формируется дополнительный боковой канал поступления транспортного шума.

Наружные стены здания выполнены из автоклавного газобетона плотностью D600 толщиной 400 мм с наружным теплоизоляционным слоем из минераловатных плит толщиной 100 мм. В базовом варианте предусмотрена штукатурная фасадная система. Светопрозрачные конструкции представлены стандартными двухкамерными оконными блоками. Площадь наружного ограждения со стороны улицы Университетской составляет 23,18 м², в том числе площадь остекления 8,95 м²; со стороны проспекта Панфилова, соответственно, 21,00 и 7,12 м². Таким образом, доля светопрозрачных участков достигает 33,9-38,6 % площади исследуемых фасадов.

Для сравнительной оценки сформированы четыре варианта: 1) базовый штукатурный фасад и стандартные окна; 2) навесной вентилируемый фасад при сохранении стандартных окон; 3) базовая глухая часть фасада и акустические оконные блоки с усовершенствованным монтажным швом; 4) комплексный навесной вентилируемый фасад, акустические окна, трёхслойный монтажный шов, шумозащищённая приточная вентиляция и локальная звукопоглощающая обработка фасадного выступа.

Оценка составного наружного ограждения выполнена энергетическим суммированием коэффициентов звукопередачи отдельных участков. Такой подход позволяет учитывать различие площадей и звукоизоляционных характеристик глухой части стены и оконного заполнения и соответствует общему принципу расчёта фасадов по ISO 12354-3 [8, с. 17-28]. В расчётной модели приняты следующие исходные индексы: глухая часть штукатурного

фасада 45,1 дБ; глухая часть с навесной фасадной системой 49,4 дБ; стандартный оконный блок 32 дБ; акустический оконный блок с асимметричным стеклопакетом 40 дБ. Значения используются для сравнительного расчётного сценария и подлежат уточнению по протоколам испытаний конкретных изделий на стадии рабочего проектирования.

В расчётной части использованы следующие зависимости. Снижение уровня шума от протяжённого линейного источника с расстоянием в принятой укрупнённой модели определялось по формуле

$\Delta L_r = 10 \lg (r / r_0)$ (1)

Расчётный уровень у фасада с учётом расстояния, экранирования, отражений и влияния межзданного коридора определялся выражением

$L_{Аф,\,расч} = L_{А0} - \Delta L_r - \Delta L_{экр} + \Delta L_{отр} + \Delta L_{кор}$ (2)

Здесь r и r0 - расчётное и исходное расстояния; ΔLэкр и ΔLотр - поправки на экранирование и отражения; ΔLкор - принятая автором поправка на дополнительное воздействие со стороны пр. Панфилова. Формулы (1)-(2) применены в рамках общей модели затухания звука на местности [13, с. 1-40; 14, с. 1-23]; ΔLкор = 3 дБ является расчётным допущением исследования, а не нормативной константой.

Требуемая звукоизоляция и её итоговое значение с принятым эксплуатационным запасом определялись по формулам

$R_{тр} = L_{Аф,\,расч} - L_{Адоп}$; $R_{тр,\,итог} = R_{тр} + \Delta R_{зап}$ (3, 4)

Допустимый уровень $L_{Адоп}$ = 30 дБА принят по СП 51.13330.2011, а запас $\Delta R_{зап}$ = 3 дБ введён как проектное допущение для учёта монтажных неплотностей, косвенной передачи и эксплуатационных отклонений [5, с. 1-46].

Поверхностная плотность и ориентировочный индекс изоляции воздушного шума глухой массивной части определялись по зависимостям

$m = \rho \cdot \delta$; $R_w = 14{,}5 \lg m + 10$ (5, 6)

Формула (6) использована как ориентировочная инженерная зависимость закона массы для сравнительной оценки вариантов [2; 3; 15] и не заменяет лабораторные частотные характеристики конкретной фасадной системы.

Приведённая звукоизоляция составного фасада рассчитывалась энергетическим суммированием коэффициентов звукопередачи стены и окон:

$R_{пр} = -10 \lg [(S_{ст} \cdot 10^{-0{,}1 R_{ст}} + S_{ок} \cdot 10^{-0{,}1 R_{ок}}) / S_{общ}]$ (7)

где $S_{ст}$, $S_{ок}$ и $S_{общ}$ - площади стены, окон и всего ограждения; $R_{ст}$ и $R_{ок}$ - соответствующие индексы звукоизоляции. Формула (7) основана на расчётном принципе ISO 12354-3:2017 [8, с. 1-29].

Относительное снижение передаваемой звуковой энергии определялось по зависимости

$\eta = (1 - 10^{-\Delta R/10}) \cdot 100\ \%$ (8)

Формула (8) следует из логарифмического определения децибела [2]; при ΔR = 7,5-7,6 дБ снижение передаваемой энергии составляет около 82 %.

Требуемый показатель приведённой звукоизоляции наружного ограждения в исследовании принят равным 38 дБ. Сравнение вариантов выполнено по четырём критериям: результирующий показатель, прирост относительно базового решения, соответствие принятому требованию и технологическая реализуемость.

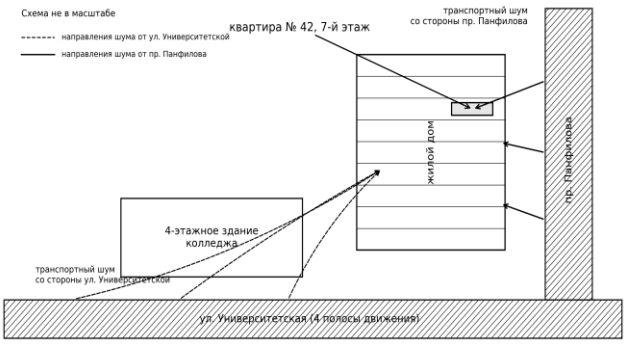


Рис. 1. Расчётная схема расположения исследуемой квартиры и основных источников транспортного шума

Таблица 1
Исходные характеристики исследуемых наружных ограждений

Ориентация фасада	Общая площадь, м²	Глухая часть, м²	Остекление, м²
Улица Университетская	23,18	14,23	8,95
Проспект Панфилова	21,00	13,88	7,12

Примечание. Геометрические характеристики приняты по материалам проектной документации исследуемого объекта.

Результаты и обсуждение

Расчёт базового варианта показал, что приведённая звукоизоляция наружного ограждения составляет 35,8 дБ для фасада, ориентированного на улицу Университетскую, и 36,3 дБ для фасада со стороны проспекта Панфилова. Оба значения ниже принятого требуемого уровня 38 дБ. При этом расчётный индекс звукоизоляции самой наружной стены превышает 45 дБ, что указывает на наличие более слабого элемента: оконного заполнения.

На первом этапе модернизации рассмотрена замена штукатурной фасадной системы на навесной вентилируемый фасад. Увеличение расчётного индекса глухой части стены с 45,1 до 49,4 дБ повысило результирующий показатель лишь до 36,0 и 36,5 дБ. Прирост составил 0,2 дБ для каждого фасада. Следовательно, при сохранении окон с индексом 32 дБ дальнейшее совершенствование массивной части наружного ограждения практически не меняет итоговую характеристику.

Полученный результат объясняется энергетическим характером суммирования путей звукопередачи. Площадь окон составляет около одной трети площади фасада, но их звукоизоляция ниже характеристики глухой части более чем на 13 дБ. Поэтому доля звуковой энергии, передаваемой через остекление, становится доминирующей. Расчётная зависимость на рис. 2 показывает, что при стандартном оконном блоке рост звукоизоляции глухой части после достижения примерно 45 дБ почти не влияет на суммарный показатель. При акустическом оконном блоке потенциал улучшения глухой части используется заметно полнее.

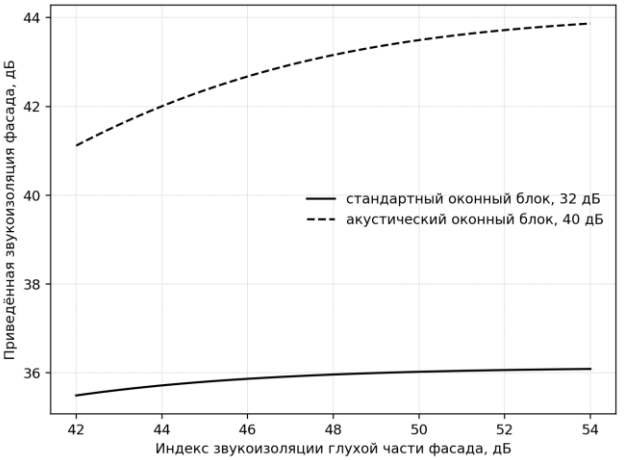


Рис. 2. Влияние характеристик глухой части фасада и оконного блока на приведённую звукоизоляцию наружного ограждения

Следующим этапом стало применение акустического оконного блока с асимметричным стеклопакетом, стёклами различной толщины и многослойным триплексом. Одновременно предусмотрен трёхслойный монтажный шов, включающий внутренний пароизоляционный слой, центральный тепло- и звукоизоляционный слой и наружную паропроницаемую защиту. Такое решение направлено не только на повышение характеристик самого оконного блока, но и на предотвращение снижения лабораторной звукоизоляции из-за негерметичных примыканий [11, с. 12-29].

При использовании акустических окон результирующая звукоизоляция достигла 42,4 дБ со стороны улицы Университетской и 42,7 дБ со стороны проспекта Панфилова. Прирост по сравнению с базовым вариантом составил 6,6 и 6,4 дБ, соответственно. Уже этот вариант обеспечивает запас относительно принятого требования 4,4-4,7 дБ.

Комплексный вариант дополнительно включает навесной вентилируемый фасад, шумозащищённую приточную вентиляцию и локальную звукопоглощающую обработку железобетонного выступа над оконными проёмами. Приточное устройство позволяет сохранять закрытое положение створок без нарушения воздухообмена. Звукопоглощающая облицовка выступа предназначена для уменьшения отражённой составляющей внешнего шума. Максимальные расчётные показатели составили 43,4 и 43,8 дБ, а прирост относительно базового решения 7,6 и 7,5 дБ.

Повышение индекса звукоизоляции на 7,5-7,6 дБ соответствует уменьшению передаваемой звуковой энергии примерно на 82%. Это подтверждает, что комплексная модернизация меняет не только формальный расчётный показатель, но и энергетический баланс проникновения внешнего шума.

Таблица 2
Сравнение вариантов модернизации наружных ограждений

Вариант	R, ул. Университетская, дБ	R, пр. Панфилова, дБ	Прирост, дБ	Соответствие 38 дБ	Приоритет
Базовый	35,8	36,3	–	нет	исходный
НВФ + стандартные окна	36,0	36,5	0,2	нет	низкий
Штукатурный фасад + акустические окна	42,4	42,7	6,4-6,6	да	высокий
Комплексный вариант	43,4	43,8	7,5-7,6	да	максимальный

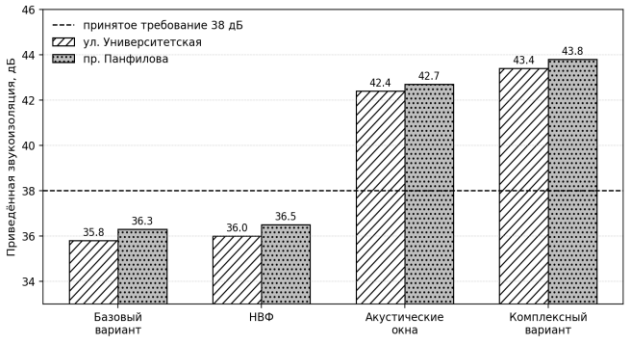


Рис. 3. Сравнение приведённой звукоизоляции наружных ограждений при различных вариантах модернизации

С инженерной точки зрения наиболее рациональна последовательность, при которой сначала устраняется наиболее слабое звено: светопрозрачные конструкции и монтажные примыкания. Навесной фасад целесообразно рассматривать как элемент комплексной системы, обеспечивающий дополнительный запас, повышение теплозащиты и долговечности, но не как самостоятельную меру, способную компенсировать низкую звукоизоляцию окон. Шумозащищённое проветривание необходимо для сохранения достигнутого результата в реальной эксплуатации, поскольку открывание створок фактически исключает защитный эффект фасада.

Полученные значения следует рассматривать как результат сравнительного расчётного исследования. Для окончательного проектного решения требуется применение частотных характеристик R(f), учёт спектральной поправки транспортного шума Ctr, характеристик вентиляционных устройств и монтажных узлов, а также подтверждение исходных параметров сертификатами или лабораторными протоколами конкретных систем. Натурная проверка после реализации должна выполняться по действующим методикам измерения звукоизоляции [6, с. 5-27; 12, с. 1-31].

Заключение

1. Результирующая звукоизоляция наружного ограждения определяется совместной работой всех его элементов; при доле остекления 33,9-38,6 % стандартные оконные блоки становятся основным путём проникновения транспортного шума.

2. Повышение расчётного индекса глухой части фасада с 45,1 до 49,4 дБ при сохранении стандартных окон увеличивает общий показатель всего на 0,2 дБ и не обеспечивает достижение принятого требования 38 дБ.

3. Применение акустических оконных блоков с асимметричным стеклопакетом и трёхслойным монтажным швом повышает приведённую звукоизоляцию до 42,4-42,7 дБ и является наиболее результативным первоочередным мероприятием.

4. Комплексный вариант, объединяющий акустические окна, навесной вентилируемый фасад, герметизированные монтажные примыкания, шумозащищённую вентиляцию и локальную звукопоглощающую обработку фасадного выступа, обеспечивает 43,4-43,8 дБ.

5. Прирост 7,5-7,6 дБ относительно базового варианта соответствует снижению проникающей звуковой энергии более чем на 80% и формирует запас 5,4-5,8 дБ относительно принятого требуемого значения.

6. Практическая значимость результатов заключается в возможности применения предложенной последовательности мероприятий при проектировании новых и реконструкции существующих многоквартирных жилых зданий в условиях интенсивного транспортного воздействия.

Научная новизна исследования заключается в применении комплексного подхода к оценке наружного ограждения как единой акустической системы, учитывающей совместное влияние фасадной системы, оконных блоков, монтажных швов, вентиляционных устройств и архитектурных элементов. Подход позволяет выявить слабое звено и обосновать рациональную последовательность реализации шумозащитных мероприятий.

Литература

1. Всемирная организация здравоохранения. Руководство по экологическому шуму для Европейского региона. Копенгаген: Европейское региональное бюро ВОЗ, 2018. 160 с.
2. Иванов Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом. Москва: Логос, 2008. 424 с.
3. Осипов Г. Л. Защита зданий от шума. Москва: Стройиздат, 1972. 216 с.
4. Rasmussen B. Sound insulation between dwellings – Requirements in building regulations in Europe // Applied Acoustics. 2010. Vol. 71. P. 373-385.
5. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003. Москва: Минрегион России, 2011. 46 с.
6. ГОСТ 27296-2012. Здания и сооружения. Методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций. Москва: Стандартинформ, 2014. 34 с.
7. ISO 717-1:2020. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. Geneva: ISO, 2020. 28 p.
8. ISO 12354-3:2017. Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound. Geneva: ISO, 2017. 44 p.
9. Lee H. P., Kumar S., Ng C. F. et al. A Systematic Review of Emerging Ventilated Acoustic Metamaterials for Noise Control // Sustainability. 2023. Vol. 15, no. 5. Article 4113. P. 1-24.
10. Tan J. K. A., Lau S.-K. Experimental study of active noise control for a full-scale plenum window in a domestic apartment // Applied Acoustics. 2024. Vol. 224. Article 110120. P. 1-13.
11. Ift Rosenheim. Guideline FE-07/1. Sound Insulation of Windows and Installation Joints. Rosenheim: Institut für Fenstertechnik, 2022. 56 p.
12. ISO 16283-1:2014. Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. Geneva: ISO, 2014. 31 p.

Improving the design of external building envelope systems to enhance acoustic comfort in multi-apartment residential buildings in dense urban areas

Markich A.A., Gromyko A.N.
Moscow University for the Humanities and Technology – Moscow Institute of Architecture and Civil Engineering

JEL classification: L61, L74, R53

The article addresses ways to improve acoustic comfort in multi-apartment residential buildings exposed to high levels of traffic noise. The aim of the study is to assess the effectiveness of a comprehensive modernization of external building envelope systems using a monolithic-frame residential building in a dense urban environment as a case study. The methodology includes calculating the overall sound insulation of a composite facade, taking into account the areas of its opaque and glazed sections, comparing four design options, and analyzing the contribution of individual elements of the acoustic envelope. The study considers a rendered facade system, a ventilated facade system, standard and acoustic window units, a three-layer installation joint, noise-protected supply ventilation, and local sound-absorbing treatment of a facade projection. It was found that replacing only the opaque part of the facade provides a limited improvement of 0.2 dB due to the dominant influence of the window systems. The use of acoustic windows increases the overall sound insulation to 42.4-42.7 dB, while the comprehensive solution increases it to 43.4-43.8 dB. The resulting improvement of 7.5-7.6 dB corresponds to a reduction in transmitted sound energy of more than 80%. The results can be used in the design of new multi-apartment residential buildings and the renovation of existing ones located near major urban roads.

Keywords: building acoustics, sound insulation, traffic noise, external building envelope systems, ventilated facade system, acoustic insulating glass unit, installation joint, acoustic comfort.

References

1. World Health Organization. Environmental Noise Guidelines for the European Region. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2018. 160 p.
2. Ivanov N. I. Engineering Acoustics: Theory and Practice of Noise Control. Moscow: Logos, 2008. 424 p. (In Russian).
3. Osipov G. L. Protection of Buildings from Noise. Moscow: Stroyizdat, 1972. 216 p. (In Russian).
4. Rasmussen B. Sound insulation between dwellings – Requirements in building regulations in Europe. Applied Acoustics, 2010, vol. 71, pp. 373-385.
5. SP 51.13330.2011. Protection against Noise. Updated Edition of SNiP 23-03-2003. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia, 2011. 46 p. (In Russian).
6. GOST 27296-2012. Buildings and Structures. Methods for Measuring Sound Insulation of Enclosing Structures. Moscow: Standartinform, 2014. 34 p. (In Russian).
7. ISO 717-1:2020. Acoustics – Rating of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements – Part 1: Airborne Sound Insulation. Geneva: ISO, 2020. 28 p.
8. ISO 12354-3:2017. Building Acoustics – Estimation of Acoustic Performance of Buildings from the Performance of Elements – Part 3: Airborne Sound Insulation against Outdoor Sound. Geneva: ISO, 2017. 44 p.
9. Lee H. P., Kumar S., Ng C. F. et al. A Systematic Review of Emerging Ventilated Acoustic Metamaterials for Noise Control. Sustainability, 2023, vol. 15, no. 5, article 4113, pp. 1-24.
10. Tan J. K. A., Lau S.-K. Experimental Study of Active Noise Control for a Full-Scale Plenum Window in a Domestic Apartment. Applied Acoustics, 2024, vol. 224, article 110120, pp. 1-13.
11. Ift Rosenheim. Guideline FE-07/1. Sound Insulation of Windows and Installation Joints. Rosenheim: Institut für Fenstertechnik, 2022. 56 p.
12. ISO 16283-1:2014. Acoustics – Field Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements – Part 1: Airborne Sound Insulation. Geneva: ISO, 2014. 31 p.