

С.Н. ОВСЯННИКОВ^{1,2}, А.С. САМОХВАЛОВ^{1,2}¹Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия²Научно-исследовательский институт строительной физики, Москва, Россия

ЗВУКОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДЕНИЯ С МАЛЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ, ВКЛЮЧАЯ ВОЗДУХООБМЕННЫЕ УСТРОЙСТВА

Аннотация. Исследовалась звукоизоляция сложных ограждающих конструкций, включающих малые технические элементы, в том числе воздухопроводы, проходящие через внутренние конструкции, и воздухообменные устройства в наружных конструкциях. На примере воздухообменных каналов и клапана «КИВ 125» показано их влияние на звукоизоляцию многослойных остеклений. Представлены результаты измерения звукоизолирующей способности одно- трехслойных остеклений с воздухообменными устройствами. Использованы стандартные методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций и малых технических элементов. Измерение звукоизоляции одно- и многослойных остеклений с воздухообменными элементами позволило выявить влияние воздухообменного канала и количества элементов остекления на звукопередачу через данный тип конструкций и разработать методику проектирования шумозащитных окон в сочетании с вентиляционными каналами или воздухообменными устройствами.

Ключевые слова: звукоизоляция, прохождение звука, многослойные остекления воздухообменные устройства.

S.N. OVSYANNIKOV^{1,2}, A.S. SAMOKHVALOV^{1,2}¹Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia²Research Institute of building physics, Moscow, Russia

SOUND TRANSMISSION THROUGH ENCLOSING STRUCTURES WITH SMALL TECHNICAL ELEMENTS, INCLUDING AIR EXCHANGE DEVICES

Abstract. The sound insulation of complex enclosing structures, including small technical elements, including air ducts passing through internal structures and air exchange devices in external structures, was studied. Using the example of air exchange channels and the KIV 125 air exchange device, their effect on the sound insulation of multilayer glazing is shown. The results of measuring the sound insulation ability of single- and three-layer glazing with air exchange devices are presented. Standard methods for measuring the sound insulation of enclosing structures and small technical elements were used. The measurement of sound insulation of single- and multi-layer glazing with air exchange elements made it possible to identify the influence of the number of glazing elements and the air exchange channel on sound transmission through this type of structures and to develop a methodology for designing noise-proof windows in combination with ventilation ducts or air exchange devices.

Keywords: sound insulation, sound transmission, multilayer glazing, air exchange device.

Введение

Проблема передачи звука через сложные ограждающие конструкции, имеющие в своем составе легкие многослойные глухие или светопрозрачные элементы в сочетании с элементами, имеющими значительно меньшую звукоизоляцию и предназначенными для пропуска коммуникаций или воздухообмена, исследована недостаточно.

© Овсянников С.Н., Самохвалов А.С., 2024

В то же время существует потребность решения таких задач, например, в расчетах звукоизоляции перегородок с проходящими через них воздуховодами, или многослойных шумозащитных окон с вентиляционными устройствами.

В зарубежной практике проектирования звукоизоляции сложных конструкций, состоящих из нескольких элементов, в соответствии с EN 12354-1, предлагается определять звукоизоляцию самой конструкции и учитывать вклад прямого звука через так называемый «малый технический элемент», для которого звукоизоляция оценивается как «приведенная разность уровней элемента» по ИСО 10140-1. В России эти документы получили статус государственного стандарта (ГОСТ Р EN 12354-1-2012 и ГОСТ Р ИСО 10140-1–2012), однако в литературе пока не встречается описание использования данной методики. Понятие «малый технический элемент» дано в ГОСТ Р ИСО 10140-1–2012, как «строительное изделие, исключая окна и двери, площадью менее 1 м²..., передающее шум независимо от прилегающих строительных конструкций».

В российской нормативной литературе расчет звукоизоляции составных ограждений, в том числе с отверстиями и щелями, предлагается выполнять по п. 9.9. СП 275. Эта методика основана на определении «звукоизоляции отверстия или щели», однако, измерить и определить собственно звукоизоляцию отверстия безотносительно от ограждающей конструкции не представляется возможным вследствие малости площади отверстия в ограждении. Поэтому в ГОСТ Р ИСО 10140-1 и ГОСТ Р ИСО 10140-1 для малых технических элементов оценивается «приведенная разность уровней элемента». Разница между звукоизоляцией и приведенной разностью уровней заключается в приведении относительно площади конструкции или стандартного звукопоглощения 10 м², что для элементов с малой площадью имеет существенное значение.

В отечественных и зарубежных работах расчет звукоизоляции однослойных ограждений ведется на основе волновой теории с учетом резонансных эффектов. Основы теории звукоизоляции однослойных пластин без учета их конечных размеров заложены в исследованиях Рэлея [1], установленная им зависимость звукоизоляции от частоты известна как «закон масс». Позднее Л. Кремер [2] исследовал звукоизоляцию однослойных конструкций в области частоты волнового совпадения, где длина изгибной волны в конструкции и след длины волны в воздухе становятся равны, в зависимости от угла падения, что приводит к снижению звукоизоляции. Исследования звукоизоляции ограждающих конструкций конечных размеров показали влияние форм колебаний однослойных панелей прямоугольной формы - угловых и краевых мод, которые на низких частотах совпадают с тангенциальными модами колебаний воздуха в помещениях [3]. Для конструкций конечных размеров на частотах ниже частоты волнового совпадения существенное влияние оказывает нерезонансная звукопередача [4]. Ее вклад в звукоизоляцию однослойных конструкций исследован в работах М.С. Седова [5] и Сэвелла [6]. Резонансная звукопередача в области и выше частоты волнового совпадения исследована в работе Г. Майданика [7], основные его выражения использованы в методике расчета звукоизоляции Р. Жосса и Дж. Ламура [8]. Эта методика вошла сначала в европейские нормы, а затем и в ГОСТ Р EN 12354-1-2012. Как показывают наши измерения и расчеты [9] она достаточно проста и дает хорошую сходимость с результатами измерений однослойных ограждений, и, по нашему мнению, более адекватна, чем другие модели прохождения звука через однослойные прямоугольные пластины [10].

Для многослойных ограждений, в частности, остеклений существенное влияние на звукоизоляцию оказывают резонансы типа «масса-упругость-масса». Исследованиям звукоизоляции многослойных ограждений занимались многие ученые, как в России, так и за рубежом. Первые зарубежные работы принадлежат А. Лондону [11]. Для двойных ограждений до практического применения доведена методика К. Гезеле [12, 13], предложившего рассчитывать резонансную частоту двойного остекления, вычисленную как для механической

системы, состоящей из двух масс и одного упругого элемента. Весь расчетный диапазон частот он разделил на 3 области и для каждой предложил расчетные формулы, в основу которых входило суммирование звукоизоляции одинарных конструкций. В России вопросами инженерного расчета звукоизоляции одинарных и двойных конструкций занимались Г.Л. Осипов, В.И. Заборов и ряд других ученых. Расчетам резонансных частот и звукоизоляции одно- двух- и трехслойных остеклений посвящен ряд работ Р.Ю. Винокура [14-16]. Следует, однако, отметить, что в ряде отечественных и зарубежных работ использованы выражения для определения коэффициентов прохождения на частотах выше резонансных, значительно завышающие звукоизоляцию. Системной ошибкой решений в [17, 18, 19], является рост звукоизоляции двойных и тройных остеклений с темпом 12...18 (до 24 дБ) на октаву и достижение чрезвычайно высоких расчетных значений звукоизоляции этих легких конструкций (до 100 дБ), что никак не подтверждается практикой наших измерений [9, 20] и измерений других лабораторий.

Влиянием отверстий различной формы на звукоизоляцию ограждений посвящен ряд работ. В работе [21] исследована звукоизоляция перегородок с отверстиями с точки зрения разборчивости речи и обеспечения конфиденциальности, в работе [22] эти же авторы в натуральных условиях исследовали 16 вариантов воздухообменных устройств в наружных конструкциях с точки зрения их акустических характеристик. Ряд работ посвящен методам снижения шума, проходящего через наружные ограждения с естественной вентиляцией, путем экранирования и акустической обработки отверстий [23, 24, 25]. Численному расчету звукоизоляции вентилируемых окон при одинарном и двойном остеклении и разными сочетаниями отверстий посвящена работа [26]. В статье [27] предложена конструкция двойного остекления с вентиляцией через воздушный промежуток и показаны результаты экспериментальных исследований звукоизоляции. В работе [28] экспериментально исследована звукоизоляция 18 типов светопрозрачных фасадов с двойным остеклением и вентиляцией через межстекольное пространство. В иностранной литературе модным направлением является применение «метасистем», так в работе [29] предложено использовать концепцию акустических метакаркасов, другими словами, встроенных в воздуховод резонаторов, снижающих уровень проходящего с воздухом шума. Подобные разработки представляют интерес для использования в теплом климате, поскольку любой вариант воздухообмена через в межстекольное пространство в морозном климате неизбежно приводит к накоплению конденсата и их обмерзанию.

Шумозащитные окна для климата России должны представлять собой многослойные герметичные конструкции, которые имеют дополнительно воздухообменные устройства в каналах, устроенных в непосредственно стене или откосах проемов. Целью данной работы показать решение задачи звукоизоляции многослойных конструкций с малыми техническими элементами на примере одно-трехслойных остеклений с воздухообменными устройствами, в частности с прямооточным клапаном КИВ 125.

Модели и методы

На протяжении ряда лет нами выполнялись исследования звукоизоляции многослойных остеклений в сочетании с воздухообменными устройствами. В работе [20] показаны результаты конструирования шумозащитных окон с воздухообменными устройствами и результаты исследования их звукоизоляции. В работе [9] представлена методика и результаты расчета звукоизоляции одинарных остеклений в одинарных переплетах с одно- и двухкамерными стеклопакетами, показана хорошая сходимость этих результатов с результатами измерений. Авторами выполнены также теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции остеклений в отдельных переплетах с числом стекол до 5, которые предполагается опубликовать в ближайшее время. В этих работах представлены аналитические решения для коэффициентов резонансного и нерезонансного прохождения

звука, которые позволяют вычислить звукоизоляцию многослойных ограждений при различных размерах и заполнении воздушных промежутков.

Результаты и обсуждения

Для обеспечения естественной вентиляции помещений зданий неизбежно приходится использовать воздухообменные устройства, обеспечивающие приток свежего воздуха с необходимой кратностью воздухообмена. С точки зрения звукоизоляции использование приточных устройств играет положительную роль, поскольку альтернативой им являются открытые створки или форточки, что приводит к снижению звукоизоляции окна до 10...15 дБА, т.е. светопрозрачная конструкция теряет свои звукоизолирующие свойства. В настоящее время применяется целая линейка воздухообменных устройств. Их можно разделить на несколько групп. Европейские производители предлагали на российский рынок различные щелевые устройства типа «AEROMAT», «VentAir» и ряд других, устраиваемые в переплетах или вместо части стеклопакета. Такие конструкции практически непригодны для холодного климата, поскольку обмерзают и не пропускают воздух. Эти решения имеют и крайне слабую звукоизоляцию. Другие решения представляют собой отверстие в стене с вентрешеткой снаружи и регулируемой заслонкой изнутри, а в самом канале размещаются теплоизоляционные вкладыши, которые отчасти выполняют и роль звукопоглотителя. К числу таких устройств можно отнести «КИВ – 125», стеновой вентклапан «СВК В-75» и ряд других аналогичных решений. В последние годы появились приточные устройства с побуждением электрическим вентилятором, с фильтрами для очистки воздуха и некоторые с функцией рекуперации. К числу таких устройств относятся «Aeromat», «Aerovital», «Аэропак-90SN», «Aerolife» и целая линейка других устройств, также имеющих прямой канал в отверстии в стене и ряд функциональных элементов, расположенных во внутреннем блоке с разными возможностями управления.

К сожалению, большинство производителей этих устройств представляют лишь некоторые технические характеристики, преимущественно имеющие рекламный характер. Нет протоколов измерений с характеристиками звукоизоляции, полученными стандартными методами по ГОСТ 27296-2012, ГОСТ Р ИСО 10140-2 –2012 и ГОСТ Р 56769-2015 (ИСО 717-1:2013).

Согласно ГОСТ Р ИСО 10140-2-2012 приточные вентиляционные устройства являются «малыми техническими элементами», характеристикой их звукоизоляции является приведенная разность уровней звукового давления между двумя реверберационными камерами, в проеме между которыми установлена стена с высокой звукоизоляцией, в которой выполнено отверстие и на нем смонтировано исследуемое устройство. Приведенная разность уровней звукового давления, как и при измерении звукоизоляции, определяется по ГОСТ 27296-2012 по 6 точкам размещения микрофона и при перемещении источника звука в 3 позиции в камере высокого уровня. При этом посредством измерения времени реверберации определяется и эквивалентное звукопоглощение A в приемном помещении. Приведенная разность уровней находится как:

$$D_n = L_1 - L_2 - 10 \lg \frac{A}{A_0} \quad (1)$$

где $A_0 = 10 \text{ м}^2$ – стандартное звукопоглощение.

По спектру приведенной разности уровней можем получить также значения одним числом со спектральными поправками $D_{nw}(C, C_{tr})$.

Суммарная звукоизоляция окна совместно с воздухообменным клапаном может быть получена с использованием формулы (16) СП 275:

$$R_{\text{ок+кл}} = 10 \lg \frac{S_{\text{общ}}}{\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{10^{0,1R_i}}} \quad (2)$$

где $S_{\text{общ}}$ – суммарная площадь окна вместе со сквозным отверстием клапана;

S_i – площади стены, окна и клапана;

R_i – звукоизоляция стены, окна и клапана.

Расчеты по этой формуле не дают корректного результата, поскольку площадь канала клапана весьма мала, а звукоизоляция отверстия сама по себе не имеет смысла без конструкции стены.

Стена, как правило, имеет значительно большую звукоизоляцию, чем окно, поэтому следует оценивать только звукоизоляцию окна совместно с приточным клапаном. В третьоктавных полосах звукоизоляция окна с клапаном:

$$R_{\text{ок+кл}} = 10 \lg \frac{S_{\text{ок}}}{\frac{S_{\text{ок}}}{10^{0,1R_{\text{ок}}} + 10^{0,1(10 \lg A_0 - D_n)}}} = 10 \lg \frac{S_{\text{ок}}}{10^{0,1R_{\text{ок}}} + 10^{(1-0,1D_n)}} \quad (3)$$

Индекс изоляции воздушного шума окна с клапаном может быть получен, зная приведенный индекс снижения шума клапаном:

$$R_{W(\text{ок+кл})} = 10 \lg \frac{S_{\text{ок}}}{10^{0,1R_{W\text{ок}}} + 10^{(1-0,1D_{nw})}} \quad (4)$$

Индекс изоляции транспортного шума окном с приточным клапаном:

$$R_{\text{Атран}(\text{ок+кл})} = 10 \lg \frac{S_{\text{ок}}}{\frac{S_{\text{ок}}}{10^{0,1R_{\text{Атран.ок}}}} + 10^{(1-0,1(D_{nw} + C_{tr}))}} \quad (5)$$

Связь между величинами звукоизоляции и приведенным перепадом звукового давления зависит только от размеров проема между реверберационными камерами:

$$D_n = R + 10 \lg \frac{A_0}{S_{np}} \quad (6)$$

где S_{np} – площадь проема между реверберационными камерами.

Исследования звукоизоляции некоторых приточных вентиляционных устройств выполнены в реверберационных камерах Томского ГАСУ, а также в натуральных условиях при измерении звукоизоляции различных типов окон с воздухообменными клапанами.

На первом этапе в реверберационных камерах выполнены измерения звукоизоляции стены в проеме 7 м^2 толщиной 410 мм из кирпичной кладки 250 мм плюс кладка из пенобетонных блоков «Сибит», толщиной 150 мм плотностью 600 мм, оштукатуренной с двух сторон тонким слоем штукатурки до 5 мм. Измерения показали для стены $R_w(C; C_{tr}) = 53 (-1;-4)$. Затем измерены приведенные разности уровней звукового давления стеной с отверстием диаметром 125 мм (рис. 1).



Рисунок 1 – Измерения звукоизоляции остеклений с клапаном КИВ 125 мм в реверберационных камерах Томского ГАСУ, вид из камеры низкого уровня и высокого уровня.

Результаты измерения звукоизоляции стены без отверстия и с отверстием, а также приведенной разности уровней для отверстия показаны на графиках рис. 2.

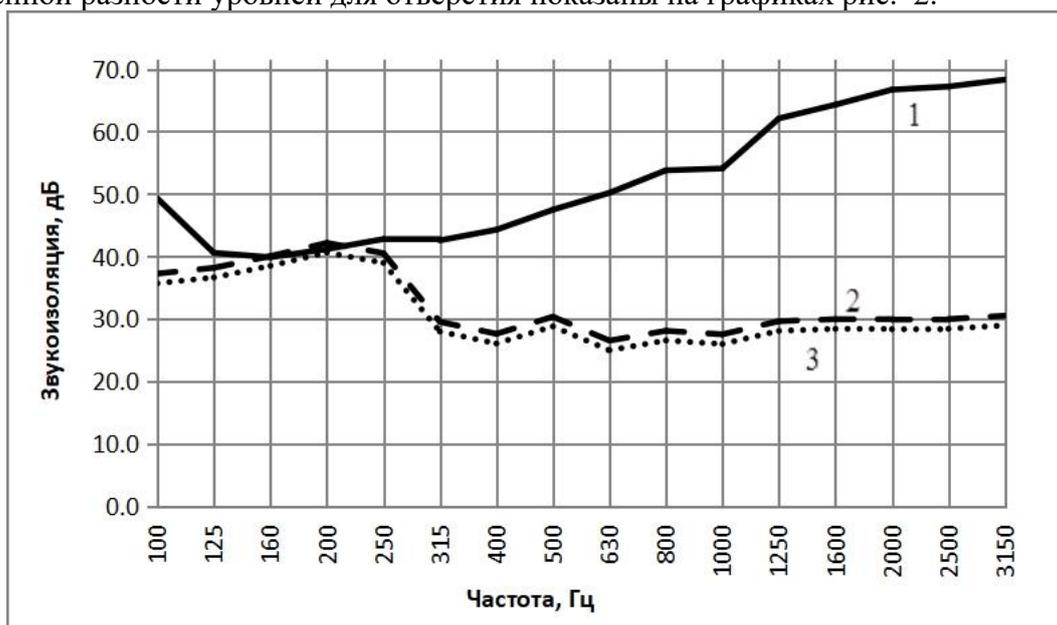


Рисунок 2 – Графики звукоизоляции: 1 – звукоизоляция стены 410 мм; 2 – график приведенной разности уровней за отверстием D125 мм в стене; 3 – звукоизоляция стены с отверстием D125 мм

Как видим, звукоизоляция стены с отверстием и приведенная разность уровней для клапана отличаются во всем диапазоне частот на 1,5 дБ. На низких частотах 160-200 Гц наблюдается максимальное снижение уровня звука за стеной с отверстием, а звукоизоляция стены без отверстия и с открытым отверстием в стене практически равны. Это означает, что звукоизоляция «малого технического элемента» отверстия в стене – равна на этих частотах звукоизоляции самой стены. На частотах свыше 250 Гц звукоизоляция стены с проемом падает до 30 дБ.

На рис. 3 представлена частотная характеристика снижения шума приточным клапаном КИВ 125 в открытом и закрытом состоянии в сборе с наружной решеткой, звукопоглощающим минераловатным рукавом в канале и внутренней регулируемой заслонкой в сравнении со звукоизоляцией стены в которой он установлен.

Приведенная разность уровней для КИВ 125 в закрытом состоянии составляет $D_{nw}(C; C_{tr}) = 44 (0;-2)$, в открытом $D_{nw}(C; C_{tr}) = 36 (0;-2)$, открывание клапана снижает звукоизоляцию сразу на 8 дБ. Из результатов измерений, показанных на рис. 2, видим, что приведенная разность уровней для клапана КИВ 125 выше, чем для отверстия в стене, и она растет на частотах от 800 Гц благодаря жалюзийным заслонкам и звукопоглощению минераловатным рукавом. Этот график показывает предельную звукоизоляцию, которую можно достичь шумозащитным окном в сочетании с приточным клапаном. Очевидно, что с клапаном такой конструкции не имеет смысла применять остекление с более высокой звукоизоляцией.

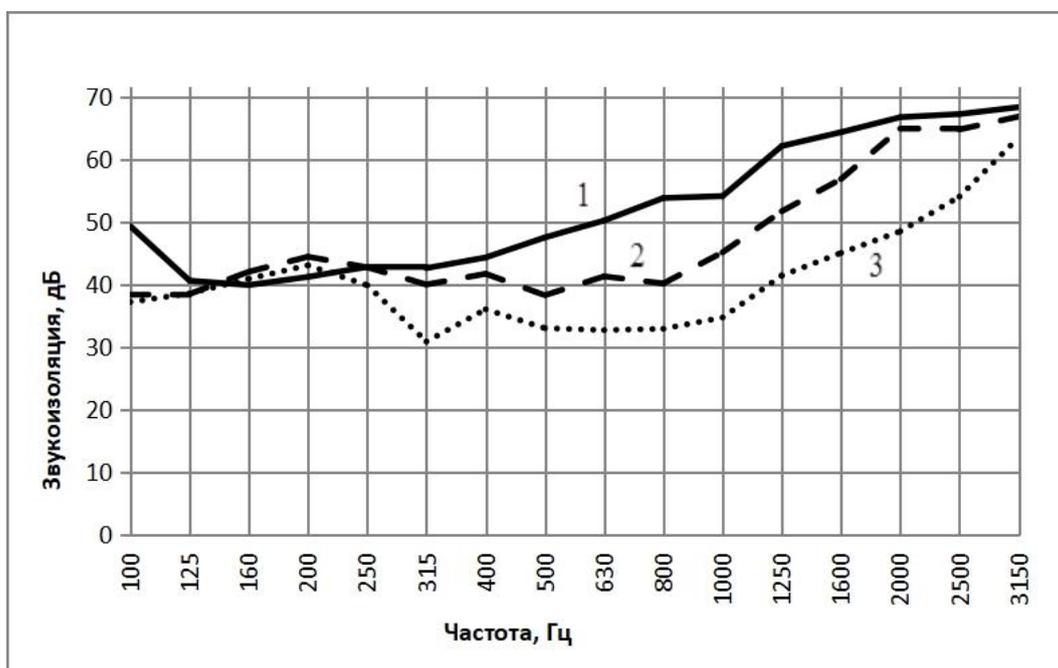


Рисунок 3 – Графики звукоизоляции стены 410 мм с приточным клапаном КИВ 125 мм: 1 – звукоизоляция стены 410 мм; 2 – график приведенной разности уровней для клапана в закрытом состоянии; 3 – график приведенной разности уровней для клапана в открытом состоянии

На следующем этапе выполнены измерения звукоизоляции одно-пятислойных остеклений совместно с открытым и закрытым приточным клапаном КИВ 125. В настоящей статье показаны результаты измерений одно-трехслойных остеклений без клапана и с клапаном КИВ 125. Это наиболее широко используемый вариант для окон в одинарных переплетах.

На рис. 4 показаны частотные характеристики звукоизоляции стены с оконным проемом, заполненным однослойным остеклением 4 мм с клапаном КИВ 125 в открытом и закрытом состоянии, в сравнении со звукоизоляцией стены и однослойного остекления 4 мм, а на рис. 5 с двухслойным остеклением с формулой остекления 4+12+4. На рис. 6 показаны частотные характеристики звукоизоляции стены с оконным проемом, заполненным трехслойным остеклением с формулой 4+12+4+12+4 с клапаном КИВ 125 в открытом и закрытом состоянии, в сравнении со звукоизоляцией стены и трехслойного остекления 4+12+4+12+4 мм.

В табл. 1 сведены результаты измерений звукоизоляции 3 типов остеклений с приточным клапаном КИВ 125.

Из графиков звукоизоляции видим, что приточный клапан КИВ 125 ухудшает звукоизоляцию остекления в области средних и высоких частот, начиная с 315 Гц, и чем выше звукоизоляция многослойного остекления, тем наблюдается больше снижение звукоизоляции остекления клапаном. Из этого следует вывод о необходимости применения приточных клапанов сложной конфигурации с 1, 2 или 3 поворотами и звукопоглощающими вкладышами на участках воздуховода.

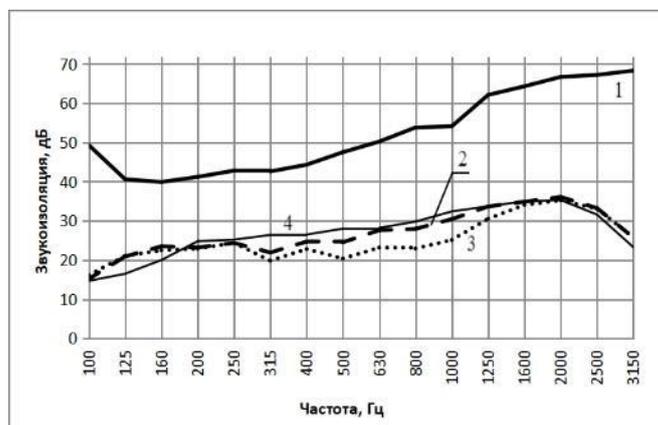


Рисунок 4 – Графики звукоизоляции однослойного остекления 4 мм с приточным клапаном КИВ 125 мм в стене 410 мм: 1 – звукоизоляция стены 410 мм; 2 – клапан в закрытом состоянии; 3 – клапан в открытом состоянии; 4 – однослойное остекление 4 мм.

Таблица 1 – Звукоизоляция остеклений с открытым и закрытым клапаном КИВ125

Наименование остекления	Звукоизоляция остекления без клапана $R_w (C; C_{tr}), \text{дБ}$	Звукоизоляция остекления с закрытым клапаном $R_w (C; C_{tr}), \text{дБ}$	Звукоизоляция остекления с открытым клапаном $R_w (C; C_{tr}), \text{дБ}$
Однослойное 4 мм	30 (-1,5; -2,5)	28 (-0,5; -1,5)	26 (-0,0; -1,5)
Двойное 4+12+4	32 (-1,5; -4,5)	31 (-1,0; -3,5)	27 (-0,5; -2,5)
Тройное 4+12+4+12+4	34 (-2,0; -6,0)	32 (-1,0; -5,0)	27 (-0,0; -2,5)

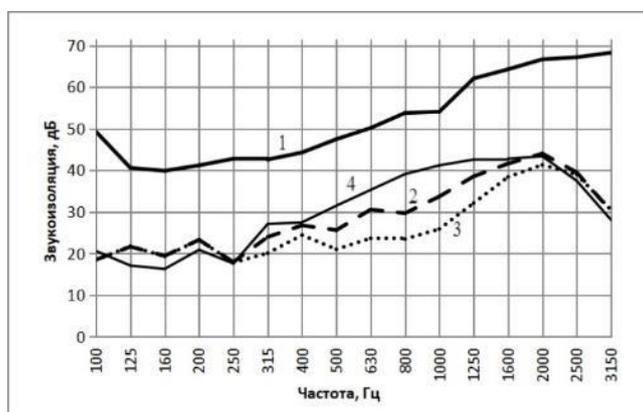


Рисунок 5 – Графики звукоизоляции двухслойного остекления 4+12+4 с приточным клапаном КИВ 125 мм в стене 410 мм: 1 – звукоизоляция стены 410 мм; 2 – клапан в закрытом состоянии; 3 – клапан в открытом состоянии; 4 – звукоизоляция остекления 4+12+4

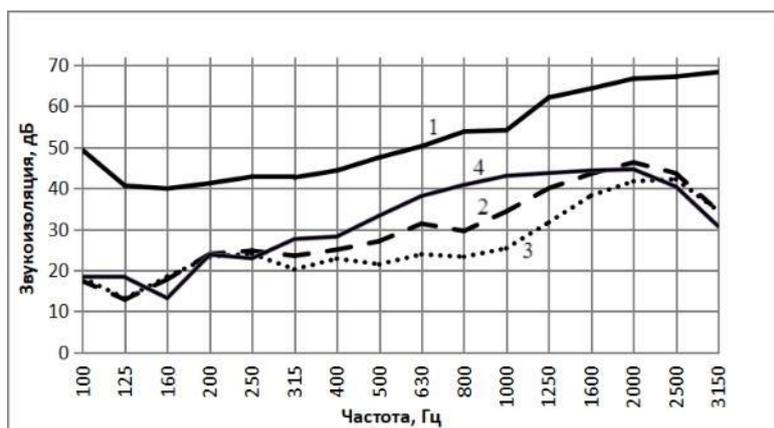


Рисунок 6 - Графики звукоизоляции трехслойного остекления 4+12+4+12+4 с приточным клапаном КИВ 125 мм в стене 410 мм: 1 – звукоизоляция стены 410 мм; 2 – клапан в закрытом состоянии; 3 – клапан в открытом состоянии; 4 – остекление 4+12+4+12+4

В Томском ГАСУ разработаны технические решения приточных клапанов [9], в составе дополнительного блока окна или в откосах проемов (см. рис. 7, 8). Эти простейшие устройства имеют минимальные затраты на изготовление и в то же время обеспечивают существенно большую звукоизоляцию в режиме проветривания. График звукоизоляции окна с двухкамерным стеклопакетом и открытым трехколенным клапаном (на рис. 8 справа) показан на рис. 9, как видим, что это устройство вместе с двухкамерным стеклопакетом имеет более высокую звукоизоляцию в области средних и высоких частот, в отличие от КИВ 125.

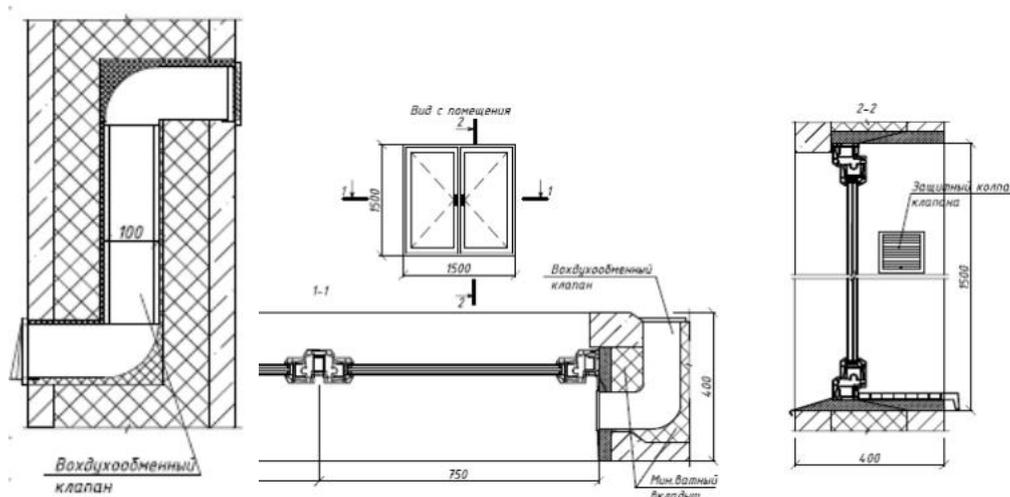


Рисунок 7 – Принципиальные решения воздухообменных клапанов для архитектурно-конструктивной системы «КУПАСС» каркасно-панельного здания



Рисунок 8 – Принципиальные решения воздухообменных клапанов для здания с кирпичными стенами

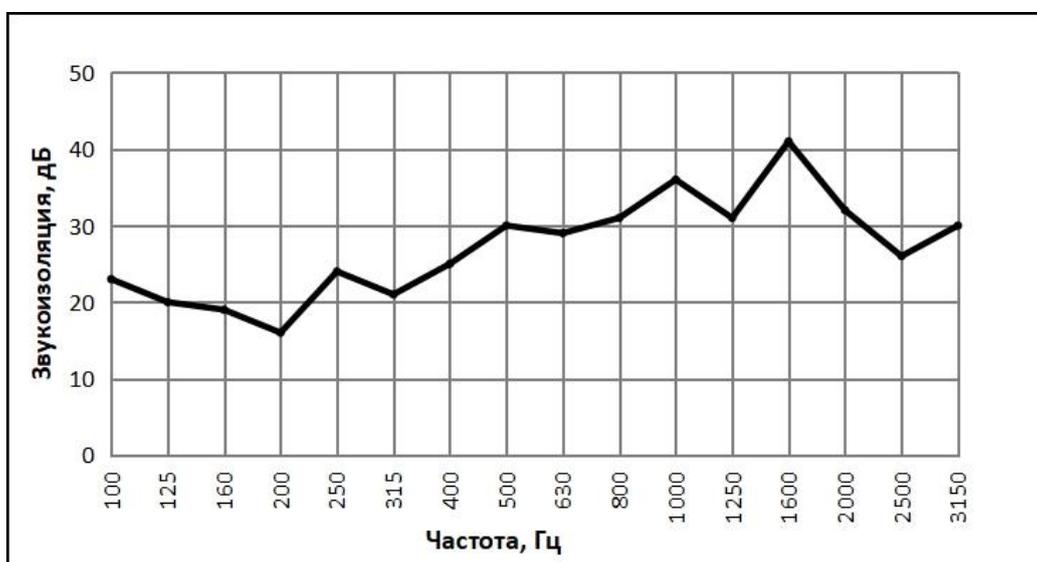


Рисунок 9 - Звукоизоляция окна с двухкамерным стеклопакетом (4+14+4+14+4) и открытым приточным клапаном с 3 поворотами на 90 градусов $R_w=29$ (-1; -2)

Выводы

1. Звукоизоляция легких многослойных ограждающих конструкций без малых технических элементов зависит от соотношения поверхностных масс и толщин воздушных промежутков. Добавление третьего стекла в двухкамерном стеклопакете практически не увеличивает звукоизоляцию по сравнению с однокамерным двойным остеклением. Для существенного увеличения звукоизоляции необходимо применять конструкции остеклений в раздельных переплетах, где один из воздушных промежутков превышает 150 мм.

2. В расчетах звукоизоляции ограждений с малыми техническими элементами следует использовать приведенные разности уровней звукового давления, измеренные в соответствии с ГОСТ 27296-2012 и ГОСТ Р ИСО 10140-2-2012, а не звукоизоляцию малого технического элемента (отверстие, щель), как предусмотрено в п. 9.9. СП 275, вследствие несопоставимо малой его площади.

3. Наличие в составе ограждающей конструкции прямого воздухообменного канала снижает звукоизоляцию на 10...15 дБ в области средних частот, что не позволяет добиться высокой звукоизоляции даже при увеличении числа слоев ограждения и их поверхностной массы.

4. При проектировании воздухообменных устройств следует использовать конструкции каналов с несколькими поворотами и звукопоглощающей отделкой каналов. Это позволяет не менее чем на 2 дБА увеличить звукоизоляцию трехслойного остекления в режиме проветривания по сравнению с прямоточными устройствами типа КИВ 125. Для шумозащитных окон в раздельных переплетах такие воздухообменные устройства дают существенно больший эффект.

5. Следует отметить необходимость получения паспортных характеристик звукоизоляции для различных «малых технических элементов», в том числе и для воздухообменных устройств, с включением этих справочных данных в СП 275. Использование этих данных с расчетными формулами для вычисления звукоизоляции различных остеклений [9] позволяет проектировать шумозащитные окна для зданий на шумных территориях.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке ФНИ РААСН, проект 3.1.4.5.

Acknowledgements

The work was carried out with the support of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, project 3.1.4.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rayleigh (J.W. Strett). Theory of sound. T.2. Translation from English, edited by S.M. Rytov. Moscow: Gostekhnstroyizdat. 1955. 476 p.
2. Cremer L. Theorie der Schalldämmung Wände bei schrägen Einfall // Akust. Zeite. 1942, Bd. 7, No 3, pp. 81–104.
3. Bhattacharya M.C., Guy R.W., Crocker M.J. Coincidence effect with sound waves in a finite plate // J. of Sound & Vibration. 1971. Vol. 18. No 2, pp. 157–169.
4. Bhattacharya M.C., Crocker M.J. Forced vibration of a panel and radiation of sound into a room // Acustica. 1970. No 22, pp. 275–294.
5. Седов М.С. Звукоизоляция. Справочник «Техническая акустика транспортных машин»: Под ред. д-ра техн. наук профессора Н. И. Иванова. СПб: Политехника, 1992. Глава 4. С. 68–106.
6. Sewell K.B. Transmission of Reverberant Sound through a Single – Leaf Partion Surrounded by an Infinite Rigid Baffle // J. of Sound and Vibration. 1970. Vol. 12. No 1. pp. 21–32.
7. Maidanik G. Response of ribbed panels to reverberant acoustic fields. // J. of the Acoustical Society of America. – 1962. –V. 34. – № 6. – P. 809-826.
8. Josse, R., Lamure J. Transmission du son par une paroi simple // Acustica. 1964. pp. 266-280.
9. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С., Звукоизоляция однослойных остеклений, одно- и двухкамерных стеклопакетов. // Жилищное строительство. 2023. № 12. С 12-17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-12-17>.
10. Leppington, F.G., Broadbent, E.G. and Heron, K.H. The acoustic radiation efficiency of rectangular panels // Proceedings of the Royal Society of London, A382. 1982. pp. 45–71.
11. London A. Transmission of reverberant sound through double walls // J. Acoust. Soc. Amer. 1950. Vol. 22. No. 2, pp. 270–279.
12. Gosele K. Zur Luftschalldämmung von einschaligen Wänden und Decken. // Acustica. 1968. 20, p. 334.
13. Gosele K. Zur Berechnung der Luftschalldämmung von doppelschaligen bauteilen.// Acustica. 1980, 45, p. 208.
14. Винокур Р.Ю., Лалаев Э.М. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляционных стеклопакетов. // В книге: Борьба с шумом и звуковой вибрацией. М.: МДНТП. 1982. с. 62-67.
15. Vinokur, R., Transmission loss of triple partitions at low frequencies. // Applied Acoustics, 1990, Vol.29 (1), pp. 15-24.
16. Vinokur, R., Simple equation for multilayer sound insulation with no interlayer sound absorption at high frequencies. //ICSV 18, Rio de Janeiro, Brazil, 2011, pp. 1-5.
17. Tadeu A.J.B., Mateus D.M.R. Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation // Applied Acoustics. 2001. Vol.62, pp. 307–325. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)0032-3](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)0032-3).

18. Xin F.X., Lu T.J. Analytical modeling of sound transmission through clamped triple-panel partition separated by enclosed air cavities // *European Journal of Mechanics A/Solids*. 2011. Vol. 30, pp. 770–782. <https://doi.org/10.1016/euomechsol.2011.14.013>
19. Kurra S. Comparison of the models predicting sound insulation values of multilayered building elements // *Applied Acoustics*. 2012. Vol.73, pp. 575–589. <https://doi.org/10.1016/apacoust.2011.11.008>.
20. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С. Окна в раздельных переплетах с высокой тепло-звукоизоляцией // *Строительные материалы*. 2012. № 6. С. 42–43.
21. Bibby C., Hodgson M. Prediction study of factors affecting speech privacy between rooms and the effect of ventilation openings. // *Applied Acoustics*. 2013. Vol. 74. pp. 585–590.
22. Bibby C., Hodgson M. Field measurement of the acoustical and airflow performance of interior natural-ventilation openings and silencers. // *Building and Environment*. 2013. Vol. 67., pp. 265-273.
23. De Salis M.H.F., Oldham D.J., Sharples S. Noise control strategies for naturally ventilated buildings. // *Building and Environment*. 2002. Vol. 37, pp. 471 – 484.
24. Alonso A., Suarez R., Patricio J., Escandon R., Sendra J. J. Acoustic retrofit strategies of windows in facades of residential buildings: Requirements and recommendations to reduce exposure to environmental noise. // *Journal of Building Engineering*. 2021.102773. pp. 1-10.
25. Bajraktari E., Lechleitner J., Mahdavi A. Estimating the sound insulation of double facades with openings for natural ventilation. // *Energy Procedia*. 2015. Vol. 78 pp. 140 – 145.
26. Xiang Yu, Siu-Kit Lau b, Li Cheng c, Fangsen Cui. A numerical investigation on the sound insulation of ventilation windows. // *Applied Acoustics*. 2017. Vol.117. pp. 113–121.
27. Liangfen Du, Siu-Kit Lau, Siew Eang Lee, Danzer M. K. Experimental study on noise reduction and ventilation performances of sound-proofed ventilation window. // *Building and Environment*. 2020. Vol.181. 107105. pp. 1-9.
28. Urbán D., Roozen N.B., Zařko P., Rychtáriková M., Tomařovič P., Glorieux C. Assessment of sound insulation of naturally ventilated double skin facades. // *Building and Environment*. 2016, Vol 110. pp. 148-160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.004>.
29. Gioia Fusaro, Xiang Yu, Jian Kang, Fangsen Cui. Development of metacage for noise control and natural ventilation in a window system. // *Applied Acoustics*, 2020. Vol. 170. 107510., pp. 1-9.

REFERENCES

1. Rayleigh (J.W. Strett). *Theory of sound*. T.2. Translation from English, edited by S.M. Rytov. Moscow: Gostekhstroyizdat. 1955. 476 p.
2. Cremer L. Theorie der Schalldämmung Wände bei schrägen Einfall *Akust. Zeite*. 1942, Bd. 7, No 3, pp. 81–104.
3. Bhattacharya M.C., Guy R.W., Crocker M.J. Coincidence effect with sound waves in a finite plate. *J. of Sound & Vibration*. 1971. Vol. 18. No 2, pp. 157–169.
4. Bhattacharya M.C., Crocker M.J. Forced vibration of a panel and radiation of sound into a room. *Acustica*. 1970. No 22, pp. 275–294.
5. Sedov M.S. Soundproofing. Handbook "Technical acoustics of transport vehicles": Ed. Dr. tech. Sciences Professor N. I. Ivanov. St. Petersburg: Polytechnic, 1992. Chapter 4. S. 68–106.
6. Sewell K.B. Transmission of Reverberant Sound through a Single – Leaf Partion Surrounded by an Infinite Rigid Baffle. *J. of Sound and Vibration*. 1970. Vol. 12. No 1. pp. 21–32.
7. Maidanik G. Response of ribbed panels to reverberant acoustic fields. *J. of the Acoustical Society of America*. – 1962. –V. 4. – № 6. – P. 809-826.
8. Josse, R., Lamure J. Transmission du son par une paroi simple. *Acustica*. 1964. pp. 266-280.
9. Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S. Sound insulation of single-layer glazing, single- and double-chamber double-glazed windows. *Housing construction*. 2023. №. 12. pp. 12-17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-12-17>.
10. Leppington, F.G., Broadbent, E.G. and Heron, K.H. The acoustic radiation efficiency of rectangular panels. *Proceedings of the Royal Society of London*, A382. 1982. pp. 45–71.
11. London A. Transmission of reverberant sound through double walls. *J. Acoust. Soc. Amer*. 1950. Vol. 22. No. 2, pp. 270–279.
12. Gosele K. Zur Luftschalldämmung von einschaligen Wänden und Decken. *Acustica*. 1968. 20, p. 334.
13. Gosele K. Zur Berechnung der Luftschalldämmung von doppelschaligen bauteilen. *Acustica*. 1980, 45, p. 208.

14. Vinokur R.Yu., Lalaev E.M. Theoretical and experimental studies of soundproof glass units. *In the book: Combating noise and sound vibration*. Moscow: MDNTP. 1982. pp. 62-67.
15. Vinokur, R., Transmission loss of triple partitions at low frequencies. *Applied Acoustics*, 1990, Vol.29 (1), pp. 15-24.
16. Vinokur, R., Simple equation for multilayer sound insulation with no interlayer sound absorption at high frequencies. *ICSV 18*, Rio de Janeiro, Brazil, 2011, pp. 1-5.
17. Tadeu A.J.B., Mateus D.M.R. Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation. *Applied Acoustics*. 2001. Vol.62, pp. 307–325. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)0032-3](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)0032-3).
18. Xin F.X., Lu T.J. Analytical modeling of sound transmission through clamped triple-panel partition separated by enclosed air cavities. *European Journal of Mechanics A/Solids*. 2011. Vol. 30, pp. 770–782. <https://doi.org/10.1016/euromechsol.2011.14.013>
19. Kurra S. Comparison of the models predicting sound insulation values of multilayered building elements. *Applied Acoustics*. 2012. Vol.73, pp. 575–589. <https://doi.org/10.1016/apacoust.2011.11.008>.
20. Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S. Windows in separate bindings with high heat and sound insulation. *Housing construction*. 2012. No. 6. pp. 42–43 (In Russian).
21. Bibby C., Hodgson M. Prediction study of factors affecting speech privacy between rooms and the effect of ventilation openings. *Applied Acoustics*. 2013. Vol. 74. pp. 585–590.
22. Bibby C., Hodgson M. Field measurement of the acoustical and airflow performance of interior natural-ventilation openings and silencers. *Building and Environment*. 2013. Vol. 67., pp. 265-273.
23. De Salis M.H.F., Oldham D.J., Sharples S. Noise control strategies for naturally ventilated build-ings. *Building and Environment*. 2002.Vol. 37, pp. 471 – 484.
24. Alonso A., Suarez R., Patricio J., Escandon R., Sendra J. J. Acoustic retrofit strategies of windows in facades of residential buildings: Requirements and recommendations to reduce exposure to environmental noise. *Journal of Building Engineering*. 2021.102773. pp. 1-10.
25. Bajraktari E., Lechleitner J., Mahdavi A. Estimating the sound insulation of double facades with openings for natural ventilation. *Energy Procedia*. 2015. Vol. 78 pp. 140 – 145.
26. Xiang Yu, Siu-Kit Lau b, Li Cheng c, Fangsen Cui. A numerical investigation on the sound insula-tion of ventilation windows. *Applied Acoustics*. 2017. Vol.117. pp. 113–121.
27. Liangfen Du, Siu-Kit Lau, Siew Eang Lee, Danzer M. K. Experimental study on noise reduction and ventilation performances of sound-proofed ventilation window. *Building and Environment*. 2020. Vol.181. 107105. pp. 1-9.
28. Urbán D., Roozen N.B., Zařko P., Rychtáriková M., Tomařovič P., Glorieux C. Assessment of sound insulation of naturally ventilated double skin facades. *Building and Environment*. 2016, Vol 110. pp. 148-160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.004>.
29. Gioia Fusaro, Xiang Yu, Jian Kang, Fangsen Cui. Development of metacage for noise control and natural ventilation in a window system. *Applied Acoustics*, 2020. Vol. 170. 107510., pp. 1-9.

Информация об авторах

Овсянников Сергей Николаевич

ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск, Россия, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Архитектура гражданских и промышленных зданий»
E-mail: ovssn@tsuab.ru

Самохвалов Александр Сергеевич

ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск, Россия, старший преподаватель кафедры «Архитектура гражданских и промышленных зданий»
E-mail: tomsk117@mail.ru

Information about authors

Ovsyannikov Sergey N.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering”, Tomsk, Russia,
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of “Architecture of Civil and Industrial Buildings”
E-mail: ovssn@tsuab.ru

Samokhvalov Alexander S.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering”, Tomsk, Russia,
Senior Lecturer of the Department of “Architecture of Civil and Industrial Buildings”
E-mail: tomsk117@mail.ru