



Моделирование в ПО COMSOL Multiphysics функциональных характеристик окон зданий ЖКХ

Введение

При проектировании, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений ЖКХ за основу берутся требования экологии к объектам недвижимости. Важной составляющей данных требований являются задачи экологии внутренней среды: тепловой и акустический комфорт помещений. То и другое условие непосредственно связано с окнами. Именно через них прежде всего выходит тепло из помещения и проникает шум улицы. Поэтому потребителю крайне важно выбрать наиболее подходящие варианты окон, удовлетворяющие, по крайней мере, отмеченным выше характеристикам помещения.

В настоящее время в России основные требования к характеристикам оконных блоков и стеклопакетов стандартизированы [1,2], в том числе и расчёт температурных полей в них [3]. В то же время за рубежом необходимо внимание уделяется и задачам верификации расчётных моделей при проектировании оконных конструкций. Так, например, международный стандарт ISO 10077-2:2012 регламентирует тепловые характеристики остекления окон и предоставляет расчётные значения, предназначенные для проверки различных компьютерных программ при моделировании тепловых потерь в оконных блоках [4].

Программное обеспечение COMSOL Multiphysics успешно проходит все подобные тестовые испытания расчёта температурных полей и тепловых потоков через ограждающие конструкции с корректным построением моделей объектов, получением расчётной сетки и заданной точности результатов [5,6]. При этом численные решения сопровождаются наглядной визуализацией, что позволяет в доступной форме объяснять сложные вопросы, возникающие при описании физики процессов в узлах строительных объектов, в частности, в оконных блоках современных зданий.

Такие оконные блоки обычно состоят не из одинарных листов стекла, а из стеклопакетов, обладающих улучшенными характеристиками теплосбережения и защиты от уличного шума. При этом структура оконных блоков значительно усложняется. Пространство между стёклами стеклопакета делается герметичным и заполняется, как правило, осушенным воздухом или инертным газом. В связи с этим у потребителя часто возникает вопрос: каким образом инертный газ в стеклопакете влияет на улучшение его эксплуатационных характеристик? Популярные объяснения сложных процессов, протекающих в межстекольном пространстве стеклопакета, сводятся к тому,

Рецензия эксперта на статью получена
08.12.2020 [Expert review on the article
received on December 8, 2020].

УДК 697.13. Научная специальность: 05.23.03.

Моделирование в COMSOL Multiphysics функциональных характеристик окон зданий ЖКХ

В.А. Сучилин, д.т.н., профессор; **А.С. Кочетков**, старший преподаватель; **Н.Н. Губанов**, старший преподаватель, Российский государственный университет туризма и сервиса (РГУТиС)

Важными составляющими требований экологии объектов недвижимости являются условия теплового и акустического комфорта помещений. Анализ функционирования окон зданий показал, что через них в основном теряется тепло помещений и проникает шум улицы. Задачи оптимизации этих процессов успешно решаются на моделях в программном обеспечении COMSOL Multiphysics. Данный метод моделирования тепловых и акустических характеристик однокамерных стеклопакетов оконных блоков проверен в зависимости от условий эксплуатации.

Ключевые слова: экология объектов недвижимости, внутренняя среда объектов, оконные блоки, стеклопакеты, тепловой комфорт, акустический комфорт, моделирование в COMSOL Multiphysics.

UDC 697.13. The number of scientific specialty: 05.23.03.

Modeling in COMSOL Multiphysics of the functional characteristics of windows in housing and communal services buildings

V.A. Suchilin, Doctor of Technical Sciences, Professor; **A.S. Kochetkov**, senior lecturer; **N.N. Gubanov**, senior lecturer, Russian State University of Tourism and Service (RSUTS, dp. Cherkizovo)

The conditions of thermal and acoustic comfort of premises are important components of environmental requirements for real estate objects. The analysis of the functioning of the windows of buildings showed that through them the heat of the premises is mainly lost and the noise of the street penetrates. Optimization of these processes is successfully solved on models in COMSOL Multiphysics software. This method of modeling the thermal and acoustic characteristics of single-chamber double-glazed windows of window blocks has been tested depending on the operating conditions.

Key words: ecology of real estate objects, the internal environment of objects, window blocks, double-glazed windows, thermal comfort, acoustic comfort, modeling in COMSOL Multiphysics.



что заполнение его простым воздухом, являющимся, между прочим, хорошим теплоизолятором, недопустимо из-за высокого содержания в нём влаги. Это неизбежно приводит к появлению конденсата в процессе эксплуатации окон. Кроме того, воздух в таком случае не решает задачи эффективной защиты помещения от уличного шума.

Все эти вопросы можно наглядно и корректно на основе фундаментальных физических законов объяснить и показать на численных моделях, построенных в ПО COMSOL Multiphysics.

При строительстве и эксплуатации зданий ЖКХ в регионах России, значительно различающихся климатическими условиями, важно иметь базу данных по функциональным характеристикам элементов оконных блоков из традиционных для данной местности строительных материалов, обеспечивающих комфортное проживание. В этой связи особенно полезно, что количественные характеристики моделей COMSOL при разных начальных условиях и свойствах материалов легко сравнивать между собой и находить оптимальный вариант.

На первом этапе исследования задач экологии внутренней среды жилого помещения решаются вопросы совместного влияния тепла и влажности на функциональные характеристики оконных блоков с однокамерными стеклопакетами.

Секция окна отделяет тёплую внутреннюю сторону помещения от его холодной наружной стороны. Конструкция модели состоит из деревянной рамы с однокамерным стеклопакетом. Геометрия модели двумерная: она представляет собой перпендикулярное сечение оконного блока, причём рассматривается только фрагмент, включающий все части его конструктивных элементов.

Таким образом, она соответствует модели Glazing Influence on Thermal Performances of Window, но для последней с по-



мощью интерфейса Heat Transfer in Solids and Fluids решалось только стационарное уравнение теплообмена [7].

Оконная рама содержит ряд полостей, предназначенных для обеспечения теплозащиты окна от внешней среды. Часть из них заполнены влагозащитными материалами. Согласно стандарту ISO 10077-2:2012, скорость теплового потока за счёт проводимости, конвекции и излучения в этих полостях задаётся эквивалентной теплопроводностью, которая зависит от их формы и размеров, а также свойств смежных материалов [4]. Одно-

камерный стеклопакет состоит из двух равных по толщине листов стекла с теплопроводностью $1,0 \text{ Вт/(м·К)}$.

Для разделения стёкол и обеспечения заданного расстояния между ними в стеклопакете используется дистанционная рамка толщиной $0,5 \text{ мм}$ из алюминия теплопроводностью 160 Вт/(м·К) . Такие строительные материалы, как дерево, рассматриваются в данной модели как пористая среда, в которой происходит перенос жидкой влаги капиллярными силами и перенос пара путём диффузии. Коэффициенты теплопроводности, диффузии и паропроницаемости такого ма-

териала зависят от величины относительной влажности. Эти функциональные зависимости из библиотеки материалов COMSOL используются в данной модели. Сопряжённый перенос тепла и влаги в строительных материалах моделируется с помощью интерфейсов Heat Transfer in Building Materials и Moisture Transport in Building Materials [5, 6].

Для установки стеклопакета применяются герметики и эластичные полимерные уплотняющие прокладки или комбинации этих материалов [2]. Исследование функциональных характеристик оконного блока при различных свойствах рабочей среды межстекольного пространства предусматривало моделирование вариантов его заполнения поочерёдно простым воздухом, осушенным воздухом, или инертным газом аргоном. В последних двух случаях для осушения среды межстекольного пространства в полость, ограниченную дистанционной рамкой стеклопакета, помещается силикагель. Свойства всех перечисленных выше материалов в данной модели также взяты из библиотеки материалов COMSOL.

При строительстве и эксплуатации зданий ЖКХ в регионах России, значительно различающихся климатическими условиями, важно иметь базу данных по функциональным характеристикам элементов оконных блоков из традиционных для данной местности строительных материалов, обеспечивающих комфортное проживание

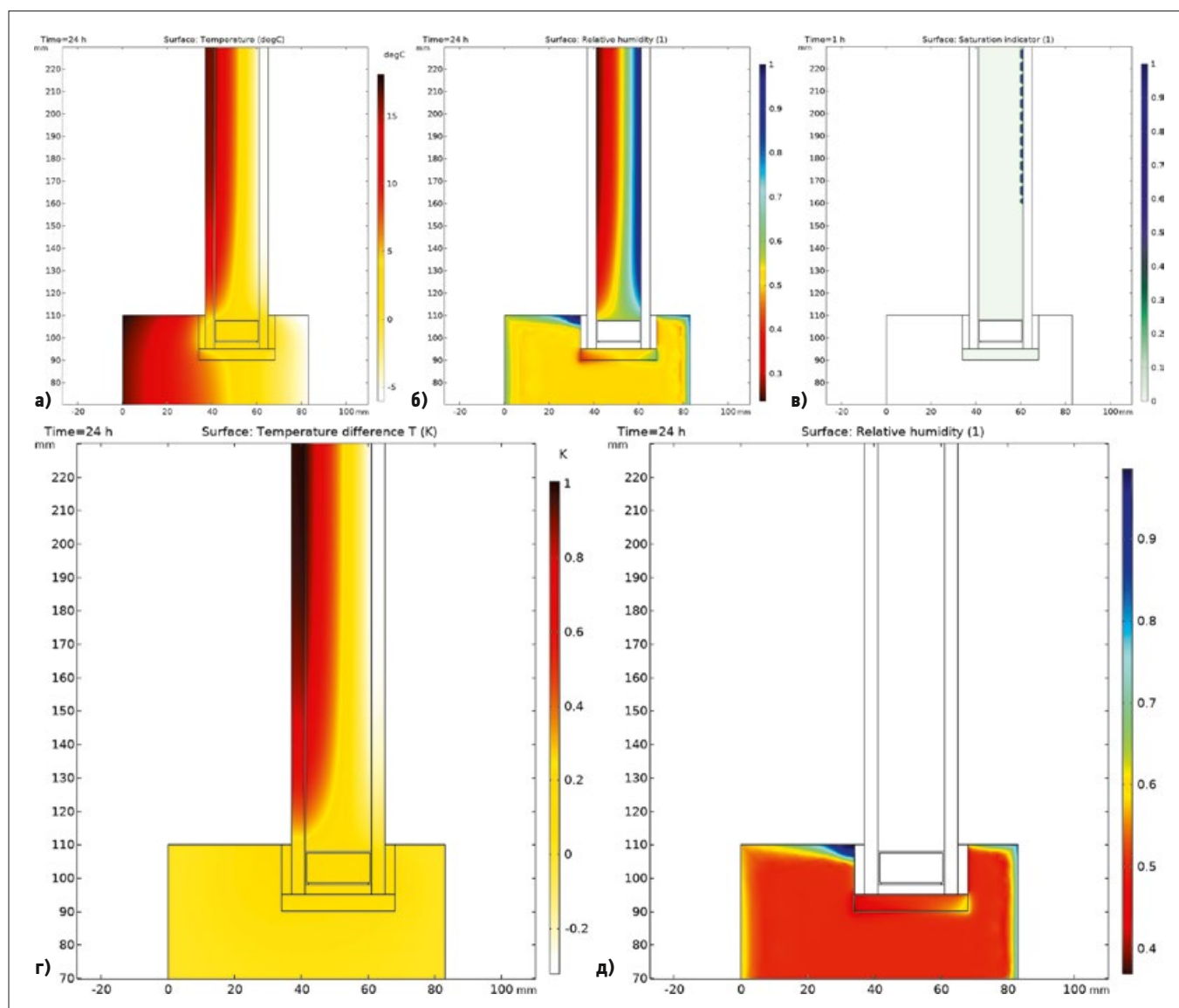


Рис. 1. Функциональные характеристики тепловлагодпереноса однокамерного стеклопакета оконного блока [а — распределение температуры на деталях оконного блока (модель 1, 24 ч); б — распределение относительной влажности на деталях оконного блока (модель 1, 24 ч); в — результат конденсации влаги на внешнем стекле (модель 1, 1 ч); г — распределение разности температур моделей 2 и 1 на деталях оконного блока (24 ч); д — распределение относительной влажности на деталях оконного блока (модель 2, 24 ч)]

Результаты

Результатом проведённого на первом этапе исследования являются характеристики тепловлагодпереноса в окнах здания в реальных условиях эксплуатации. В модели использованы условия температуры наружного воздуха в Москве, меняющиеся в интервале от $-5,3$ до $-6,9^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности от 79 до 89 % в течение суток 15 января, взятые из базы метеорологических данных Американского общества инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха (ASHRAE 2017). Приняты также температура воздуха в помещении 20°C и относительная влажность 50 %.

Функциональные характеристики тепловлагодпереноса показаны на рис. 1. Первоначально рассматривается заполнение межстекольного пространства простым воздухом (модель 1). На рис. 1а приве-

дено распределение температуры на деталях оконного блока в ночное время по истечении суток (24 ч). Видно, что внешняя поверхность наружного стекла блока остыла до температуры около $-5,5^{\circ}\text{C}$, а внутренняя его поверхность — до около $-5,3^{\circ}\text{C}$. Температура воздуха в пространстве между стёклами стеклопакета изменяется от -5 до 15°C . Поверхность внутреннего стекла оконного блока в помещении имеет температуру примерно $16,5^{\circ}\text{C}$. Температура внутри рамы блока также распределяется неравномерно: от -5°C на наружной стороне до 18°C на внутренней стороне. Важно отметить, что в области вблизи алюминиевой рамки стеклопакета, вследствие высокой теплопроводности, происходит значительный перенос тепла из помещения наружу. Видно, что граница зоны отрицательных температур доходит до нижней части

внутреннего стекла стеклопакета. В этой области возможно появления сырости на раме оконного блока.

На рис. 1б дано распределение относительной влажности на деталях оконного блока в тот же момент времени. Видно, что относительная влажность между стёклами стеклопакета изменяется от почти 100 % вблизи внутренней поверхности наружного стекла до менее 30 % на внутренней поверхности внутреннего стекла. Относительная влажность внутри деревянной рамы блока также распределена неравномерно. Наружная сторона рамы имеет относительную влажность 75–80 %, близкую к уличной. В центральной части рамы относительная влажность снижается до 50 %, причём в неветилируемой воздушной полости даже до 36 %, в то время как область внутренней стороны рамы, прилегающая к поверхности вну-

тренного стекла, отсыревает до значения относительной влажности 100 %. Это вызвано тем, что алюминиевая рамка, обладая высокой теплопроводностью, оказывает значительное влияние на распределение температуры в оконном блоке и рост влажности в ближайшей к ней области рамы. Зона повышенной относительной влажности (55–60 %) проходит также по всей внутренней стороне рамы, что является следствием влагопереноса в дереве.

На рис. 1в показан результат конденсации влаги, осаждаемой из воздуха в межстекольном пространстве стеклопакета в начале суток (1 ч). Критерием конденсации является условие равенства парциального давления и давления насыщенного водяного пара. На внутренней поверхности наружного стекла выделяются множественные небольшие зоны в форме капель, в которых это условие выполняется. Процесс конденсации активно начинается в ночное время в начале суток при температуре наружного воздуха $-6,6^{\circ}\text{C}$. В дальнейшем капли влаги на стекле будут замерзать, так как температура воздуха в межстекольном пространстве понизится до отрицательной.

Затем в качестве рабочей среды межстекольного пространства рассматривается инертный газ аргон (модель 2). Для сравнения данных двух моделей на рис. 1г приведено распределение разности температур на деталях оконного блока, полученных при использовании аргона и простого воздуха (24 ч). Видно, что разность температур положительна в межстекольном пространстве и достигает наибольшего значения 1°C вблизи внутреннего стекла. Таким образом, при заполнении аргоном тепловые характеристики стеклопакета улучшаются.

Это вызвано тем, что по сравнению с воздухом аргон обладает меньшей теплопроводностью и большей плотностью. Последнее приводит к уменьшению теплообмена за счёт конвекции.

На рис. 1д дано распределение относительной влажности на деталях оконного блока в тот же момент времени. При этом в модели 2 между стёклами стеклопакета отсутствует среда влагопереноса, следовательно, исключается конденсация влаги на поверхностях стекла. Внутри деревянной рамы распределение относительной влажности незначительно отличается от модели 1. Центральная часть деревянной рамы имеет невысокую относительную влажность около 50 %, в то время как на небольшом участке, прилегающем к поверхности внутреннего стекла, её значение близко к 100 %. Это, как и в модели 1, вызвано близостью алюминиевой рамки



в основании стеклопакета и её влиянием на распределение температуры в оконном блоке (рис. 1а).

Исследовались также функциональные характеристики теплового переноса в деталях оконного блока при заполнении межстекольного пространства осушенным воздухом. Они примерно совпадают с представленными выше функциональными характеристиками модели 2. Таким образом, осушенный силикагелем воздух или инертный газ в стеклопакетах устраняют возможность появления конденсата, повышая тем самым прозрачность окон. А для снижения потерь тепла через окна с однокамерными стеклопакетами необходимо заменять алюминиевые дистанционные рамки на конструкции, выполненные из материала с более низкой теплопроводностью, например, из высокопрочного пластика.

Необходимо также отметить, что в настоящее время широко применяются однокамерные энергосберегающие стеклопакеты, оснащённые теплоотражающей плёнкой. Структура подобных оконных блоков позволяет экономить энергию, отражая часть тепла, исходящего из помещения наружу зимой, и предохранять помещение от чрезмерного перегрева, отражая солнечные лучи в летнее время.

В настоящее время широко применяются однокамерные энергосберегающие стеклопакеты, оснащённые теплоотражающей плёнкой. Структура подобных оконных блоков позволяет экономить энергию, отражая часть тепла, исходящего из помещения наружу зимой

Для повышения теплового комфорта помещения можно использовать стеклопакеты и с большим межстекольным расстоянием, так как воздух, как отмечалось выше, является хорошим теплоизолятором. Однако и этих случаях необходимы подобные исследования функциональных характеристик стеклопакетов.

Предметом второго этапа моделирования задач экологии внутренней среды жилого помещения являются вопросы воздействия уличного шума на функциональные характеристики оконных блоков с однокамерными стеклопакетами.

Проблеме снижения уровня шума, поступающего с улицы, уделяют внимание ещё на этапе строительства, например, покрывая стены шумозащитными материалами. Однако именно окна являются наиболее слабым звеном в звукоизоляции помещений. Сделать светопрозрачные конструкции, какими являются окна, сравнимыми по звукоизоляционным характеристикам с капитальными стенами, очень сложно. Среди материалов, используемых при создании светопрозрачных конструкций, силикатное стекло пока безальтернативно. Показатели звукоизоляции изделий из стекла и методика её оценки установлены в [8]. Для одинарного стекла действуют два закона акустики (закон частот и закон масс), применимые ко всем монолитным одинарным перегородкам вне зависимости от материала, из которого они изготовлены [9].

Закон частот гласит, что для тонких перегородок любого размера звукоизоляция возрастает на 6 дБ при удвоении средней частоты. Таким образом, стекло должно обеспечивать лучшую изоляцию от шума более высокой частоты по сравнению с низкочастотными шумами.

Однако существует резонансная частота, при которой скорость свободного изгиба перегородки равна скорости звука в воздухе, при этом лист стекла спонтанно вибрирует под действием звуковой волны, что существенно ухудшает звукоизоляцию. При комнатной температуре резонансная частота равна примерно $f_{cr} = 12\,800/\delta$, где δ — толщина стекла, мм. Например, для стекла толщиной 4 мм резонансная частота равна 3200 Гц.

Закон масс гласит, что при удвоении массы перегородки уровень звукоизоляции возрастает на 6 дБ при постоянной частоте. Но увеличение толщины стекла, которое теоретически должно повысить звукоизоляционные свойства одинарного остекления, имеет определённый недостаток, связанный со смещением зоны резонансной частоты в сторону низких частот, что снижает степень изоляции от низкочастотного шума.

Чтобы улучшить шумозащищённость помещений, в коммунальном хозяйстве используют стеклопакеты, которые являются основным звукоизолирующим элементом окна. В самом простом варианте однокамерного стеклопакета применяются стекла одинаковой толщины. Хотя по сравнению с одинарным стеклом степень звукоизоляции теоретически должна резко возрастать (на 18 дБ) с удвоением частоты, однако эффективность симметричного однокамерного стеклопакета зачастую ниже, чем монолитного остекления суммарной толщиной стекла. Это вызвано тем, что стеклопакет образует колебательную систему двух стёкол с упругой связью через воздух. Данная система обладает резонансной частотой в низкочастотной зоне от 200 до 300 Гц в зависимости от толщины стекла. Звукоизоляция значительно снижена в частотной области между точкой резонансного провала формируемой колебательной системы и резонансной частотой отдельных листов стекла [10].

Для обеспечения эффективной звукоизоляции резонансная частота системы «стекло — воздух — стекло» должна быть меньше 100 Гц. Существуют различные технические и организационные решения этой проблемы. Нежелательно простое увеличение воздушной прослойки между листами стекла, так как стеклопакет получается слишком толстым. Вместо этого для заполнения межстекольного пространства используют инертный газ, который плотнее воздуха и оказывает большее сопротивление звуковой волне. Также в однокамерных стеклопакетах могут применяться листы стекла разной толщины, что снижает резонансные яв-



ния в стеклопакете. Применяют и так называемый «триплекс». В этой конструкции одно стекло выполняется сдвоенным с прослойкой из шумозащитной плёнки, которая поглощает вибрацию в стекле. Технология позволяет значительно повысить звукоизоляцию оконного блока [11].

Эти и другие технические решения, призванные повысить шумозащищённость окон, нуждаются в строгих инженерных обоснованиях, так как физические процессы, протекающие в элементах оконных блоков, весьма сложны и разнообразны. Эти задачи, как уже отмечалось, успешно решаются в ПО COMSOL Multiphysics, что подтверждается приведёнными ниже исследованиями.

Уличный шум представляет собой результат наложения звуков различной частоты, создающих непрерывный спектр. Суммарная звуковая волна характеризуется частотой и амплитудой колебаний. Она переносит энергию механических колебаний и создаёт акустическое давление p [Па]. Уровень звукового давления или громкость звука L_p [дБ] определяется по формуле $L_p = 20 \lg(p/p_0)$, где p_0 — опорный уровень давления 2×10^{-5} Па. Именно звуковое давление как воспринимаемая величина нормируется стандартами по защите от шума [12]. Но для определения шумозащитных характеристик удобнее использовать акустическую мощность W [Вт] и её уровень L_W [дБ]: $L_W = 10 \lg(W/W_0)$, где $W_0 = 10^{-12}$ Вт. Акустическая мощность является интегральной характеристикой, так как определяет полную акустическую энергию, излучае-

Нежелательно простое увеличение воздушной прослойки между листами стекла, так как стеклопакет получается слишком толстым. Вместо этого для заполнения межстекольного пространства используют инертный газ, который плотнее воздуха и оказывает большее сопротивление звуковой волне

мую в единицу времени, причём низкочастотный звук, обладая большей мощностью, оказывает и более значительное звуковое давление на остекление оконного блока. В связи с этим акустические характеристики стеклопакета оконного блока рассматриваются в статье в основном в низком и среднем диапазоне частот.

Важной характеристикой шумозащищённости зданий является уровень потерь при звукопередаче через ограждающую конструкцию Sound Transmission Loss (STL, дБ), которая определяется как $STL = 10 \lg(W_{in}/W_{tr})$, где W_{in} — полная мощность, падающая на конструкцию; W_{tr} — общая передаваемая мощность. Существует несколько стандартов для измерений STL и методов, разработанных для прямого или косвенного измерения падающей и передаваемой мощности [13, 14]. При этом стремятся достичь равномерного распределения уровня звукового давления по всему объёму помещения и равномерности направлений прихода звуковых волн в любую точку, то есть характеристик диффузного поля.

Математический метод расчёта STL через компонент здания основан на предположении об идеальном диффузном поле на стороне источника и идеальном безэховом завершении на стороне приёмника и действителен для конструктивных элементов, которые имеют небольшое влияние на акустическое поле на стороне источника (STL более 10 дБ), в частности, для окна со стеклопакетом.

В данной модели на стороне источника поле (и его отражения) не моделируется, а просто прикладывается как нагрузка на конструкцию. Диффузное поле определяется как сумма N плоских волн со случайным направлением и случайной фазой (здесь $N = 100$), и соответствующих отражённых волн. Модель учитывает нарастание давления на внешнее стекло вследствие отражений. На стороне приёмника воздушная область, усечённая идеально согласованными слоями (PML), используется в качестве безэхового завершения. Статистический характер диффузного поля указывает на то, что модель следует запускать несколько раз с различными случайными начальными числами. Это особенно важно на высоких частотах.

Геометрия модели трёхмерная и включает стеклопакет со всеми конструктивными элементами. Таким образом, она соответствует модели Sound Transmission Loss Through a Window, для которой с помощью интерфейса Acoustic-Solid Interaction, Frequency Domain уравнение звукового поля решалось в частотной области [15].

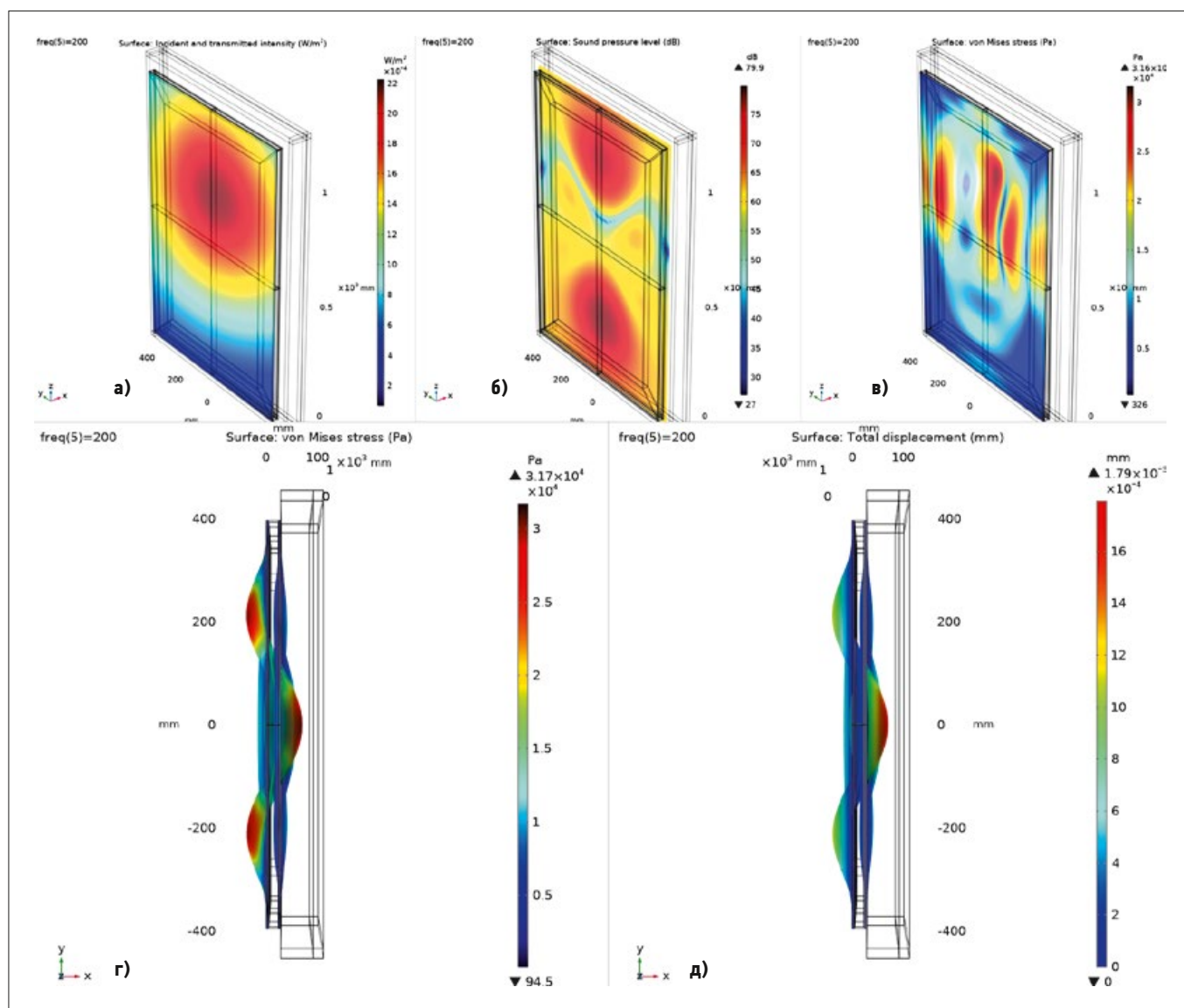


Рис. 2. Функциональные акустические характеристики однокамерного стеклопакета оконного блока (модель 1, 200 Гц) [а — распределение интенсивности падающего звука; б — распределение уровня передаваемого звукового давления; в — распределение напряжения по Мизесу на наружном стекле стеклопакета; г — распределение напряжения по Мизесу на стёклах стеклопакета в проекции вдоль оси Oy; д — деформация (в увеличенном масштабе) стёкол стеклопакета в проекции вдоль оси Oy]

На рис. 2 показаны функциональные акустические характеристики однокамерного стеклопакета оконного блока (оба стекла по 4 мм), заполненного осушенным воздухом (модель 1). На рис. 2а приведено распределение по поверхности внешнего стекла оконного блока интенсивности падающего звука [$\text{Вт}/\text{м}^2$] для 200 Гц, что соответствует громкости около 100 дБ (принятой как исходная величина для моделирования) звука, поступающего с улицы и создающего на внешнем стекле распределение со значениями максимума и минимума 93,5 и 78,4 дБ, соответственно (расчётные величины).

На рис. 2б показано распределение уровня передаваемого звукового давления [дБ], создаваемого в этом случае звуковой волной на внутреннем стекле. Видно, что значительное давление сосредоточено в двух симметричных областях

сверху и снизу стекла с максимальной величиной 79,9 дБ. Разделяющая их зона соответствует минимальному уровню звукового давления 27 дБ. Таким образом, график подтверждает звуковые потери при передаче звука через стеклопакет, но волновой характер распределения затрудняет количественную оценку.

На рис. 2в приведено распределение напряжения по Мизесу на наружном стекле стеклопакета под действием давления падающей звуковой волны. Видно, что оно также имеет волновой характер, причём значительное напряжение неравномерно распределено с максимумом $3,16 \times 10^4$ Па в поперечных (по ширине) зонах стекла, что обусловлено длиной волны и размерами стекла.

Более наглядно напряжения в обоих стёклах показаны на рис. 2г в проекции вдоль направления оси Oy. Видно, как на

пряжение наружного стекла через воздух межстекольного пространства передаётся на внутреннее стекло с сохранением профиля волны, но с меньшим максимумом $1,65 \times 10^4$ Па.

На рис. 2д в той же проекции показана в увеличенном масштабе деформация стёкол стеклопакета. Видно, что распределение деформации также носит волновой характер. Наружное стекло деформируется с максимумом $1,79 \times 10^{-3}$ мм, передавая звуковую волну через воздушную среду на внутреннее стекло. Максимальное же значение деформации внутреннего стекла стеклопакета равно 1×10^{-3} мм.

Это объясняется тем, что в низкочастотной зоне система «стекло — воздух — стекло», как указывалось выше, имеет определённую резонансную частоту, передавая в помещении повышенное акустическое давление.

Как отмечалось, использование инертного газа, по мнению специалистов-практиков, влияет на звукоизоляцию оконных блоков [11]. Для исследования этого вопроса осуществлено моделирование процесса звукопередачи в стеклопакете с межстекольным пространством, заполненным аргоном (модель 2). Получены соответствующие функциональные характеристики стеклопакета оконного блока, которые показаны на рис. 3. Установлено, что аргон действительно снижает давление звуковой волны. Так как интенсивность падающего звука зависит только от начальных параметров диффузного поля, её распределение будет тем же, что и в модели 1 (рис. 2а). Также сохраняется и распределение громкости звука на наружном стекле. На рис. 3а показано распределение уровня передаваемого звукового давления. Его волновой характер существенно изменился по сравнению с моделью 1 (рис. 2б), а максимум снизился до 74,9 дБ против 79,9 дБ в модели 1.

На рис. 3б приведено распределение напряжения по Мизесу на наружном стекле. Видно, что оно мало отличается от модели 1 (рис. 2в), но максимальное значение $2,76 \times 10^4$ Па ниже, чем $3,16 \times 10^4$ Па в модели 1. Максимум напряжения на внутреннем стекле $1,59 \times 10^4$ Па против $1,65 \times 10^4$ Па в модели 1. Через инертный газ межстекольного пространства напряжение наружного стекла передаётся звуковой волной на внутреннее стекло. Максимальное значение деформации наружного стекла равно $1,24 \times 10^{-3}$ мм, что меньше, чем $1,79 \times 10^{-3}$ мм в модели 1. Внутреннее стекло также деформируется, но не более чем на $5,71 \times 10^{-4}$ мм, что меньше 1×10^{-3} мм в модели 1, передавая ослабленную звуковую волну в помещение. Тем самым подтверждается положительная роль аргона в снижении деформации в стеклопакете оконного блока.

Известно мнение [13], что функциональные характеристики однокамерного стеклопакета существенно улучшаются при увеличении толщины одного из стёкол. Помимо действия закона масс можно ожидать, что разная толщина стёкол в стеклопакете снижает резонансные явления. В связи с этим осуществлено моделирование процесса звукопередачи в стеклопакете с межстекольным пространством, заполненным осушенным воздухом, и с внутренним стеклом толщиной 6 мм (модель 3). Получены соответствующие функциональные характеристики стеклопакета оконного блока (рис. 3). На рис. 3 показано распределение уровня передаваемого звукового давления. Оно заметно отличается как от модели 1

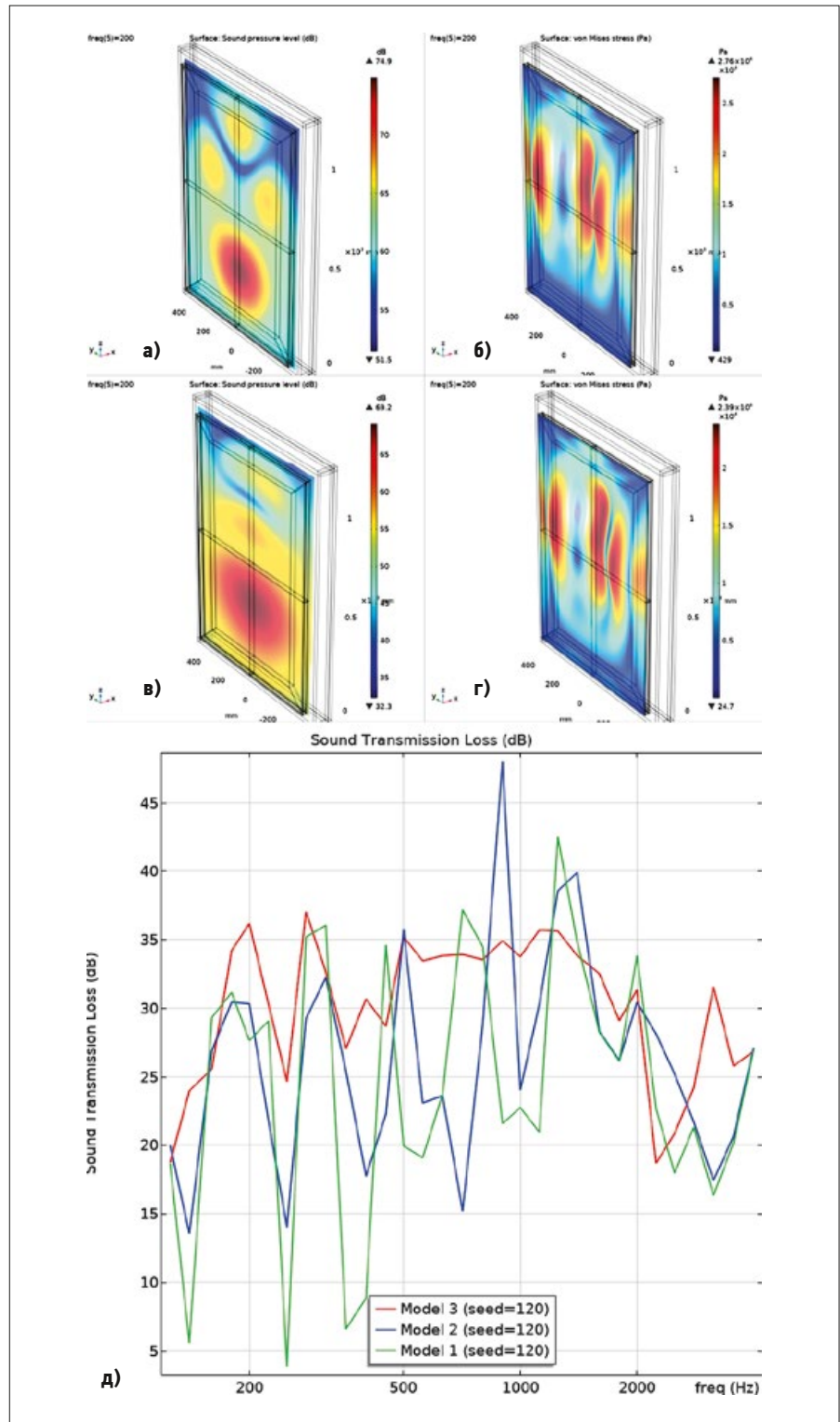


Рис. 3. Функциональные акустические характеристики однокамерного стеклопакета оконного блока [а — распределение уровня передаваемого звукового давления (модель 2, 200 Гц); б — распределение напряжения по Мизесу на наружном стекле стеклопакета (модель 2, 200 Гц); в — распределение уровня передаваемого звукового давления (модель 3, 200 Гц); г — распределение напряжения по Мизесу на наружном стекле стеклопакета (модель 3, 200 Гц); д — потери при передаче звука через стеклопакет (модели 1–3)]

(рис. 2б), так и от модели 2 (рис. 3а), а волновой характер распределения затрудняет количественную оценку. Однако максимум снизился до 69,2 дБ против 79,9 дБ в модели 1 и 74,9 дБ в модели 2.

На рис. 3г дано распределение напряжения по Мизесу на наружном стекле. Видно, что его характер близок к модели 1 (рис. 2в), и модели 2 (рис. 3б), но

максимальное значение напряжения $2,39 \times 10^4$ Па ниже, чем $3,16 \times 10^4$ Па в модели 1 и $2,76 \times 10^4$ Па в модели 2.

Максимум напряжения на внутреннем стекле $9,92 \times 10^3$ Па также меньше, чем $1,65 \times 10^4$ Па в модели 1 и $1,59 \times 10^4$ Па в модели 2. Распределение деформации стёкол стеклопакета в модели 3 также носит волновой характер.

Максимальное значение деформации наружного стекла равно $1,28 \times 10^{-3}$ мм, что меньше $1,79 \times 10^{-3}$ мм модели 1, но почти равно $1,24 \times 10^{-3}$ мм модели 2. Деформация внутреннего стекла не превосходит $2,27 \times 10^{-4}$ мм против 1×10^{-3} мм модели 1 и $5,71 \times 10^{-4}$ мм модели 2. Подтверждается, что более толстое внутреннее стекло действительно снижает давление звуковой волны, так как резонансные частоты стёкол различны и провал совпадения частот размывается в обширном частотном спектре, а в районе 200 Гц исчезает. Рост массы по сравнению со стеклопакетом модели 1 также способен сократить провал в диапазоне низких частот.

Качество звукоизоляции оконных блоков в заданном спектре частот звуковой волны удобно показывать на графиках потерь при передаче звука. На рис. 3д приводятся значения STL как функции частоты в диапазоне от 125 до 4000 Гц. Для модели 1 (синяя линия) на низких частотах звукоизоляция плохая, видна значительная неравномерность STL, что объясняется, как отмечено выше, резонансными явлениями. Два провала (около 170 и 250 Гц) представляют первые две моды механических колебаний конструкции. На этих частотах значения STL низкие, а звукоизоляция плохая. Выше резонансов кривая следует закону масс с увеличением STL на 6 дБ на октаву, но на частоте 3200 Гц, где скорость собственных колебаний стекла равна скорости звука в воздухе, присутствует резонансный провал.

Для модели 2 (зелёная линия) на низких и средних частотах (от 100 до 500 Гц) звукоизоляция лучше, STL более равномерная, резонансных явлений не наблюдается. В то же время на частоте 3200 Гц сохраняется резонансный провал.

Для модели 3 (красная линия) звукоизоляция стеклопакета существенно улучшилась — до 36 дБ для 200 Гц при хорошей равномерности в диапазоне частот 100–500 Гц. Далее до 1000 Гц равномерность STL ещё улучшается. Резонансный провал смещён в область 2000 Гц.

Очевидно, что для подтверждения эффективности звукоизолирующих конструкций при производстве и эксплуатации оконных блоков более сложной конструкции, например, с двух- и трёхкамерными стеклопакетами, также необходимо предварительное моделирование физических процессов тепловлагопереноса и звукопередачи. Важно также определить функциональные характеристики стеклопакетов при использовании других инертных газов, при других характеристиках звукового поля, в том числе с учётом температуры наружного воздуха.



При этом анализ литературных источников и авторские исследования численных моделей, построенных в ПО COMSOL Multiphysics, показали широкие возможности данного пакета для оценки эффективности и других звукоизолирующих конструктивных решений при использовании различных материалов (бетона, ДСП, металла, пластика), часто применяемых в системе ЖКХ.

Значения акустических характеристик стеклопакета оконного блока, полученные при моделировании в COMSOL Multiphysics, позволяют оценивать потери звука, поступающего с улицы, во всём диапазоне частот

Заключение

1. Проведённое моделирование функциональных характеристик однокамерных оконных блоков в процессах тепло-влажнопередачи и звукопередачи в среде COMSOL Multiphysics показало широкие возможности данного ПО при исследовании физических процессов в ограждающих строительных конструкциях.

2. В данном исследовании получены численные подтверждения возможности повышения энергосбережения и улучшения показателей шумозащищённости однокамерных стеклопакетов за счёт модернизации и применения в них ряда дополнительных технических решений, ранее отмеченных специалистами-практиками.

3. Высокая точность полученных результатов и визуализация средствами ПО COMSOL Multiphysics позволяют идентифицировать многие особенности физических процессов, протекающих в материалах и деталях конструкций оконных блоков. В частности, исследование распределения температуры и относительной влажности на деталях оконного блока выявило необходимость использования в дистанционных рамках стеклопакетов материалов, обладающих более низкой теплопроводностью, а установка в стеклопакете более толстого внутреннего стекла — повышение температуры межстекольной среды. В целом, удалось отметить и объяснить ряд физических яв-

ний, что важно для понимания функциональных возможностей оконных блоков и необходимости непрерывного совершенствования их характеристик.

4. Изучение характера распределения звукового давления, зон напряжений и деформаций в стеклопакете под действием моделируемого звукового поля позволяет объяснять причины появления трещин в стеклопакетах оконных блоков при эксплуатации, прогнозировать характер и места возможных разрушений стекольных листов при достижении предельных значений действующих нагрузок.

5. Значения акустических характеристик стеклопакета оконного блока, полученные при моделировании в COMSOL Multiphysics, позволяют оценивать потери звука, поступающего с улицы, во всём диапазоне частот и, следовательно, определять уровень звукового давления в помещении, являющийся одним из главных параметров экологического состояния его внутренней среды в регламентах отечественных СНиП. ●

- ГОСТ 24700–99. Блоки оконные деревянные со стеклопакетами. ТУ. — М.: Госстрой России; ГУП ЦПП, 2000. 52 с.
- ГОСТ 24866–2014. Стеклопакеты клеёные. ТУ. — М.: Стандартинформ, 2015. 28 с.
- ГОСТ Р 56926–2016. Конструкции оконные и балконные различного функционального назначения для жилых зданий. Общие ТУ. — М.: Стандартинформ, 2016. 46 с.
- ISO 10077-2:2012. Thermal performance of windows, doors and shutters. Calculation of thermal transmittance. Part 2: Numerical method for frames. European Committee for Standardization. Web-source: iso.org. Access data: October 21, 2020.
- Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Моделирование в COMSOL Multiphysics энергопотерь сооружений ЖКХ в зависимости от условий эксплуатации // Журнал СОК, 2019. №4. С. 74–79.
- Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Моделирование в COMSOL Multiphysics энергосбережения типовых зданий ЖКХ при реконструкции и ремонте // Журнал СОК, 2020. №6. С. 44–50.
- Glazing influence on thermal performances of window. COMSOL Multiphysics User's Guide. Web-source: comsol.com. Access data: October 21, 2020.
- ГОСТ EN 12578–2015. Стекло и изделия из него. Показатели звукоизоляции. — М.: Стандартинформ, 2016. 23 с.
- Боголепов И.И. Акустика зданий. Акустика современных жилых, общественных и промышленных зданий: Учебник для вузов. — СПб., 2015. 496 с.
- Осипов Л.Г., Бобылев В.Н., Борисов Л.А. и др. Звукоизоляция и звукопоглощение: Учебное пособие. — М.: Изд-во «АСТ»; Изд-во «Астрель», 2004. 450 с.
- Акустические характеристики стекла. Шумоизоляция [Электр. текст]. ООО «Альфа Гласс». Режим доступа: alflaglass.ru. Дата обраб. 21.10.2020.
- ГОСТ Р 56769–2015 (ИСО 717-1:2013). Здания и сооружения. Оценка звукоизоляции воздушного шума. — М.: Стандартинформ, 2016. 20 с.
- ГОСТ Р ИСО 10140-2–2012. Акустика. Лабораторные измерения звукоизоляции элементов зданий. Часть 2. Измерение звукоизоляции воздушного шума. — М.: Стандартинформ, 2013. 20 с.
- Боголепов И.И., Столярова Н.П. Звукоизоляция окон: методы определения // Журнал СОК, 2010. №2. С. 88–91.
- Sound transmission loss through a window. COMSOL Multiphysics User's Guide. Web-source: comsol.com. Access data: October 21, 2020.

References — see page 79.

Modeling in COMSOL Multiphysics of the functional characteristics of windows in housing and communal services buildings. Pp. 56–63.

Vladimir A. Suchilin, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Alexander S. Kochetkov**, senior lecturer; **Nikolay N. Gubanov**, senior lecturer, Russian State University of Tourism and Service (RSUTS, dp. Cherkizovo)

1. GOST 24700–99 [State Industry Standard of Russia No. 24700–99]. *Bloki okonnyye derevnyanye so steklopaketami. TU* [Windows of wood with glazing units. Specification]. Moscow. Gosstroj Rossii [Federal Agency for Construction and Housing and Communal Services (Gosstroy of Russia)]. GUP CPP [State Unitary Enterprise “Design Products Center in Construction”]. 2000. [In Russian]
2. GOST 24866–2014 [State Industry Standard of Russia No. 24866–2014]. *Steklopakety kleenye. TU* [Insulating glass units. Specifications]. Moscow. Standartinform [Russian Scientific-Technical Information Centre for Standardization, Metrology and Conformity Assessment (“Standartinform” Publishers)]. 2015. [In Russian]
3. GOST R 56926–2016 [State Industry Standard of Russia No. 56926–2016]. *Konstrukcii okonnyye i balkonnyye razlichnogo funktsional’nogo naznacheniya dlya zhilykh zdaniy. Obshchie TU* [Window and balcony constructions of different functional purpose for residential buildings. General specifications]. Moscow. Standartinform [“Standartinform” Publishers]. 2016. [In Russian]
4. ISO 10077-2:2012. Thermal performance of windows, doors and shutters. Calculation of thermal transmittance. Part 2: Numerical method for frames. European Committee for Standardization. Web-source: iso.org. Access data: October 21, 2020.
5. V.A. Suchilin, A.S. Kochetkov, N.N. Gubanov. *Modelirovanie v COMSOL Multiphysics jenergoпотer’ sooruzhenij ZhKH v zavisimosti ot uslovij jekspluatacii* [COMSOL Multiphysics modeling of energy losses of housing and communal services, depending on operating conditions]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing. Heating. Ventilation]. 2019. No. 4. Pp. 74–79. [In Russian]
6. V.A. Suchilin, A.S. Kochetkov, N.N. Gubanov. *Modelirovanie v COMSOL Multiphysics jenergosberezheniya tipovykh zdaniy ZhKH pri rekonstrukcii i remonte* [Modeling in COMSOL Multiphysics energy saving of typical housing and communal services buildings during reconstruction and repair]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing. Heating. Ventilation]. 2020. No. 6. Pp. 44–50. [In Russian]
7. Glazing influence on thermal performances of window. COMSOL Multiphysics User’s Guide. Web-source: comsol.com. Access data: October 21, 2020.
8. GOST EN 12758–2015 [State Industry Standard of Russia No. 12758–2015]. *Steklo i izdeliya iz nego. Pokazateli zvukoizoljatsii* [Glass and glass products. Sound insulation values]. Moscow. Standartinform [“Standartinform” Publishers]. 2016. [In Russian]
9. I.I. Bogolepov. *Akustika zdaniy. Akustika sovremennykh zhilykh, obshchestvennykh i promyshlennykh zdaniy: Uchebnik dlja vuzov* [Building acoustics. Acoustics of modern residential, public and industrial buildings: A textbook for universities]. St. Petersburg. 2015. 496 p. [In Russian]
10. L.G. Osipov, V.N. Bobylev, L.A. Borisov et al. *Zvukoizoljatsiya i zvukopogloshhenie: Uchebnoe posobie* [Sound insulation and sound absorption: A textbook for universities]. Moscow. Izd-vo “AST” [“AST” Publishers]. Izd-vo “Astrel” [“Astrel” Publishers]. 2004. 450 p. [In Russian]
11. *Akusticheskie harakteristiki stekla. Shumoizoljatsiya* [Acoustic performance of glass. Noise isolation]. “Al’fa Glass”, LLC. Web-source: alflaglass.ru. Access data: October 21, 2020. [In Russian]
12. GOST R 56769–2015 [State Industry Standard of Russia No. 56769–2015] (ISO 717-1:2013). *Zdaniya i sooruzheniya. Ocenka zvukoizoljatsii vozdušnogo shuma* [Buildings and constructions. Rating of airborne sound insulation]. Moscow. Standartinform [“Standartinform” Publishers]. 2016. 20 p. [In Russian]
13. GOST R ISO 10140-2–2012 [State Industry Standard of Russia No. 10140-2–2012]. *Akustika. Laboratornye izmereniya zvukoizoljatsii jelementov zdaniy. Chast’ 2. Izmerenie zvukoizoljatsii vozdušnogo shuma* [Acoustics. Laboratory measurements of sound insulation of building elements. Part 2. Measurement of airborne sound insulation]. Moscow. Standartinform [“Standartinform” Publishers]. 2013. 20 p. [In Russian]
14. I.I. Bogolepov, N.P. Stoljarova. *Zvukoizoljatsiya okon: metody opredeleniya* [Sound insulation of windows: methods of determination]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing. Heating. Ventilation]. 2010. No. 2. Pp. 88–91. [In Russian]
15. Sound transmission loss through a window. COMSOL Multiphysics User’s Guide. Web-source: comsol.com. Access data: October 21, 2020.