

Моделирование в **COMSOL** **Multiphysics** функциональных характеристик дверей и окон объектов социальной инфраструктуры

Рецензия эксперта на статью получена
09.01.2023 [The expert review of the article
was received on January 9, 2023]

При проектировании и строительстве социальных объектов учитываются основополагающие требования экологии внутренней среды их помещений. Важной составляющей данных требований являются задачи соблюдения теплового и акустического комфорта посетителей и обслуживающего персонала объектов. Решение их во многом зависит от реальных функциональных характеристик входных дверей и оконных блоков объекта, так как именно через них преимущественно выходит тепло из помещения и проникает шум с улицы и звуки, вызванные порывами ветра. В связи с этим при проектировании социальных объектов необходимо предварительно проводить термодинамические и акустические исследования и подтверждать качество функциональных характеристик входных дверей и оконных блоков.

При моделировании структуры подобных объектов согласно технологии информационного моделирования здания (Building Information Modeling, BIM) дверные и оконные блоки рассматриваются как готовые изделия и выбираются уже на первоначальных этапах проектирования [1]. В дальнейшем партию неподходящих дверных и оконных блоков (как и другие готовые изделия объекта) можно заменить на приобретённые у другого производителя, отличающиеся по параметрам от первоначального варианта. Технология BIM-проектирования предусматривает, что предложенная модель может менять своё содержание и конфигурацию на протяжении всего жизненного цикла объекта. Также к 3D-характеристикам модели можно добавлять показатели, изменяющиеся в течение эксплуатации, которые особо важны, например, для дверей и окон, и тогда модель становится уже 4D-моделью BIM. Далее модель объекта

проходит этап энергомоделирования зданий Building Energy Modeling (BEM). Это серия инженерных расчётов, позволяющих прогнозировать энергоэффективность отдельных систем объекта, в том числе дверных и оконных блоков.

В зависимости от поставленных задач энергомоделирование может быть проведено на основе специальных инженерных отечественных или зарубежных программных комплексов. В данном случае используется программное обеспечение [COMSOL Multiphysics](#).

BIM-проектирование предусматривает, что предложенная модель может менять своё содержание и конфигурацию на протяжении всего жизненного цикла объекта. Также к 3D-характеристикам модели можно добавлять показатели, изменяющиеся в течение эксплуатации

Учитывая, что исследуемые функциональные характеристики входных дверей и оконных блоков объекта схожи, так как именно через них может выходить тепло из помещений и проникать внутрь шум улицы, рационально для подобных изделий применить метод унификации при моделировании и разработке. То есть в данном объекте, например, можно установить стеклянные входные двери из аналогичных с окнами стеклопакетов и оптимизировать их (так же, как и оконные блоки) по параметрам энергосбережения и шумозащищённости. При этом будет повышен и уровень естественного освещения помещений объекта, и, как следствие, комфортность пребывания посетителей и обслуживающего персонала.

УДК 697.13. Научная специальность: 2.1.3 (05.23.03).

Моделирование в **COMSOL Multiphysics** функциональных характеристик дверей и окон объектов социальной инфраструктуры

В.А. Сучилин, д.т.н., профессор; А.С. Кочетков, старший преподаватель; Н.Н. Губанов, старший преподаватель, [Российский государственный университет туризма и сервиса \(РГУТиС, дп. Черкизово Московской области\)](#)

Тепловой и акустический комфорт помещений социальных объектов является важным требованием экологии внутренней среды пребывания посетителей и обслуживающего персонала. Анализ функционирования входных дверей и окон подобных объектов показал, что через них в значительной мере уходит тепло помещений и проникает шум с улицы и звуковое воздействие ветра. Задачи минимизации этих процессов успешно моделируются и исследуются в ПО **COMSOL Multiphysics**. Методика моделирования тепловых и акустических характеристик социальных объектов проверена в зависимости от их условий эксплуатации.

Ключевые слова: экология социальных объектов, внутренняя среда помещений, дверные и оконные блоки, стеклопакеты, ветровая конвекция, скорость воздушных потоков, энергия воздушных потоков, энергосбережение, шумозащищённость, моделирование в **COMSOL Multiphysics**.

UDC 697.13. Scientific specialty number: 2.1.3 (05.23.03).

Modeling in **COMSOL Multiphysics** of the functional characteristics of doors and windows of social infrastructure facilities

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 \(RGUTS, dp. Cherkizovo, Moscow region\)](#)

Thermal and acoustic comfort of the premises of social facilities is an important requirement of the ecology of the internal environment of visitors and service personnel. Analysis of the functioning of the entrance doors and windows of such objects showed that the heat of the premises will go and the noise of the street and the sound effect of the wind penetrate through them to a large extent. The tasks of minimizing these processes are successfully simulated and examined in the **COMSOL Multiphysics**. The methodology for modeling thermal and acoustic characteristics of social facilities is tested depending on the operating conditions.

Key words: ecology of social facilities, internal environment of premises, door and window blocks, double-glazed windows, wind convection, speed of air flows, energy of air flows, energy saving, noise protection, modeling in **COMSOL Multiphysics**.

Кроме того, надо иметь в виду, что метод унификации изделий сокращает трудоёмкость их проектирования и производства, упрощает эксплуатацию, облегчает проведение модернизации отдельных морально устаревших составных частей. Унификация — важное направление в развитии современных технологий, широко используемое в информационном обеспечении производства, и как комплексный процесс охватывает вопросы проектирования, контроля и эксплуатации строительных и иных объектов.

Что касается оконных блоков, то они ранее рассматривались авторами в [2], где решались в основном задачи сравнения функциональных характеристик различных оконных стеклопакетов, в конструкции которых толщина стекольных листов выбиралась из нескольких значений, а пространство между стёклами могло заполняться обычным воздухом, осушённым воздухом или инертным газом, что оказывало влияние на температурный режим и акустику помещения. Таким образом, функциональные характеристики стеклопакетов сравнивались по критериям теплосбережения и шумозащищённости помещений.



Эти задачи и поиск их оптимальных решений во многом относятся и к дверным блокам, выполненным из специального стекла или стеклопакетов повышенной прочности. При этом надо иметь в виду, что при строительстве и эксплуатации подобных социальных объектов в регионах России необходимо учитывать определяющие климатические условия, которые могут разительно отличаться. Особенно это касается ветровых характеристик и зимних температур окружающей среды в данной местности.

Все эти вопросы можно успешно моделировать, наглядно и корректно показать и объяснить на основе фундаментальных физических законов методом конечных элементов в ПО [COMSOL Multiphysics](#).



В данной статье представлена методика моделирования и исследования функциональных характеристик входных дверей и оконных блоков одного вида социальных объектов, рассмотренного в предыдущей статье [3], где с целью энергосбережения в зимний период эксплуатации объекта была выполнена комплексная оценка тепловой и ветровой защищённости объекта путём использования теплоизоляционных стеновых блоков. Но при этом положение входных дверей и окон в стеновых блоках не указывалось и в тепловых расчётах не учитывалось.

Исследуемая модель и результаты

На первом этапе решения поставленных задач геометрическая модель социального объекта, внешняя поверхность которого задана как циклоидальная поверхность переноса, дополняется теплоизоляционными, а также дверным и оконным блоками. В статье [3] в зимний период времени объект был дополнен утепляющими блоками, которые заполняют восемь открытых проёмов в стенах конструкции и четыре куполообразные полости под крышей. Как внешняя поверхность, так и дополненная модель объекта состоят из четырёх идентичных частей куполообразной формы. Фронтальная сторона объекта испытывает максимальное воздействие ветрового давления. Входную дверь предполагается расположить на фронтальной стороне правой части объекта, а окно — на боковой. Для сокращения расчётного времени достаточно провести исследования для этой части объекта, включающей теплоизоляционный стеновой блок с входной дверью на фронтальной стороне и теплоизоляционный стеновой блок с окном на боковой стороне.

Унифицированный стеклопакет в данной конструкции двери и окна состоит из двух листов стекла одинаковой тол-

щины 4 мм, соединённых пластмассовой рамой толщиной 5 мм. Межстекольное пространство заполнено обычным воздухом. Для разделения стёкол используется дистанционная алюминиевая рамка толщиной 1 мм. Герметичность стеклопакета обеспечивается специальным герметиком, а для осушения межстекольного пространства используется силикагель [4]. Дверь и окно устанавливаются в стеновые блоки с помощью соединительных пластиковых каркасов, причём дверной блок выступает наружу от поверхности стены, а оконный утоплен внутрь.

Согласно библиотеке материалов ПО [COMSOL](#), теплопроводность оконного стекла составляет 1,0 Вт/(м·К), материала рамы — 0,2 Вт/(м·К), алюминиевого сплава — 201 Вт/(м·К), материала герметика — 0,25 Вт/(м·К), силикагеля — 0,13 Вт/(м·К), соединительного каркаса — 0,18 Вт/(м·К), а теплопроводность воздуха зависит от температуры. Конструкция дверей и окон, используемые материалы в модели могут быть и другими, что определяется прежде всего видом социального объекта, его функциональным назначением и условиями окружающей среды.

В интерфейсе Turbulent Flow, k - ϵ моделировалось воздействие ветрового потока со скоростью $U = 20$ м/с, что соответствует турбулентному течению, на $1/4$ часть объекта с установленными дверью и окном. Далее для этой части модели проводились термодинамические и акустические исследования.

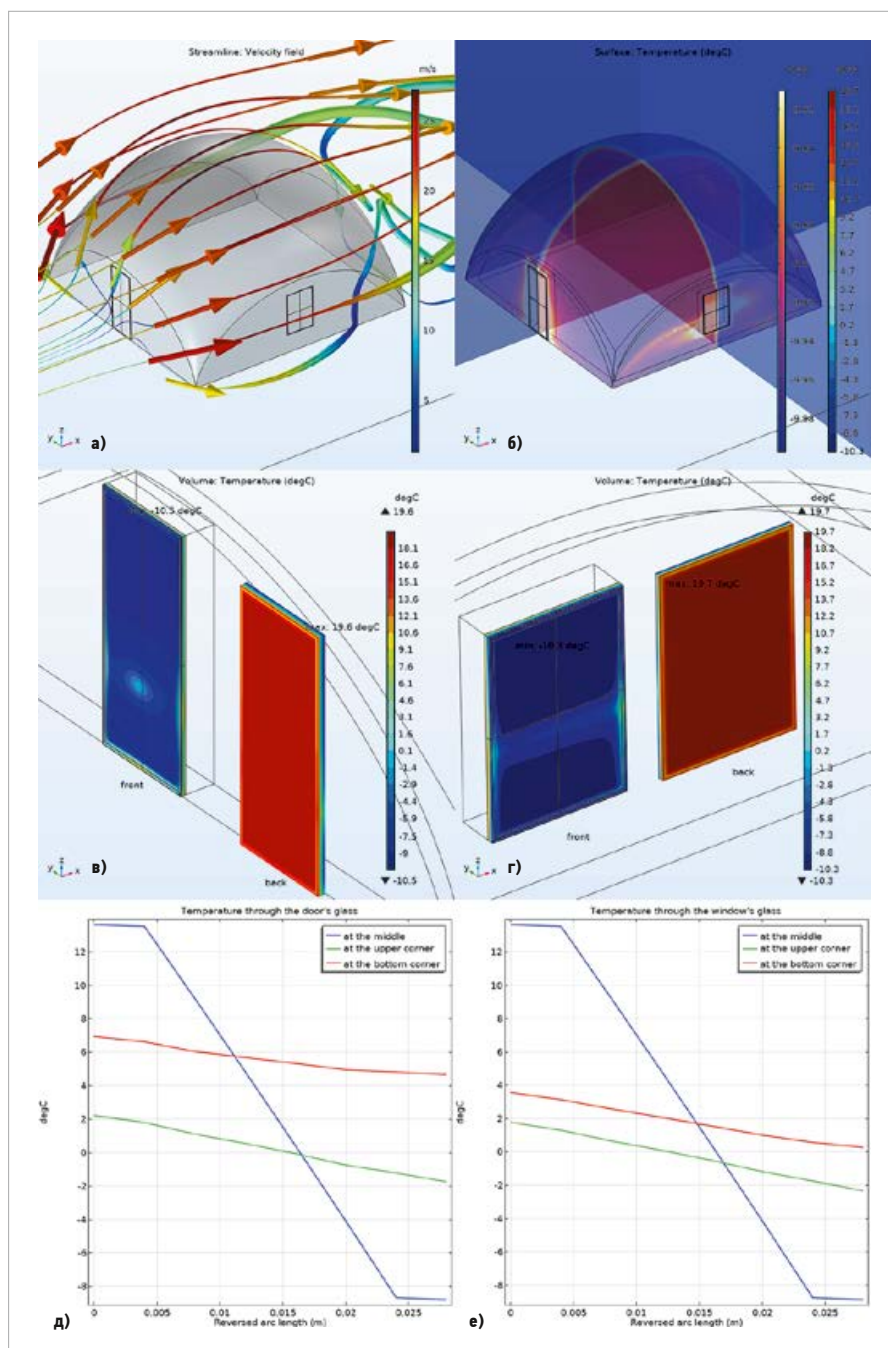
Исследования задач экологии внутренней среды социального объекта включают вопросы совместного влияния внешней температуры и ветровой конвекции на функциональные характеристики дверных и оконных блоков. Априори предполагается, что блоки входной двери и окна являются тепловыми мостами, влияющими на энергоэффективность помещения.

Ранее в [2] скорость теплового потока в них за счёт проводимости, конвекции и излучения задавалась эквивалентной теплопроводностью, которая зависит от их формы и размеров, а также свойств смежных материалов. Теперь же принудительная ветровая конвекция моделируется как действие неизотермического турбулентного потока в интерфейсе Heat Transfer in Solids and Fluids. Температура наружного воздуха на входе в воздушный домен принималась равной -10°C , температура воздуха внутри помещения поддерживается равной $+20^{\circ}\text{C}$, что моделируется с помощью узла Isothermal Domain (источник тепла не указывается).

По сравнению с [3] форма объекта усложнилась, поэтому, согласно методике расчёта [5], для решения осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса (RANS) приходится изменить размеры воздушного домена в модели до $82 \times 48,4 \times 13,2$ м. Функциональные характеристики энергозащищённости модели в зимний период представлены на рис. 1.

На рис. 1а показаны воздушные потоки в зоне контакта с моделью. Цвет линий поля скорости соответствует средней скорости потока, а толщина пропорциональна кинетической энергии турбулентности k . Видно, что скорость и направление воздушного потока при обтекании модели, изменяются неравномерно. Сталкиваясь с фронтальной поверхностью, поток резко тормозится (скорость части линий потока воздуха слева и справа от двери снижается), передавая давление на её элементы, и изменяет направление, энергия турбулентности растёт. Над верхней и частью боковой поверхности скорость потока достигает $25\text{--}30$ м/с, но энергия турбулентности уменьшается, течение становится однородным, вихри не образуются. Следовательно, можно ожидать повышенной ветровой конвекции именно на элементах этих поверхностей обтекания. Видно, что в целом течение воздушных потоков не становится вихревым вблизи поверхности модели, что обусловлено хорошей аэродинамической формой модели с закрытыми стенными проёмами и удачным расположением в них двери и окна. В то же время отдельные линии воздушного потока при скорости $10\text{--}15$ м/с получают завихрение вне поверхности модели (справа и сзади). Это может повлиять на снижение ветровой конвекции на исследуемых конструктивных элементах модели.

Комплексное моделирование и исследование воздушных потоков в зоне расположения модели позволило вычислить и визуализировать их характеристики по параметрам скорости, кинетической



•• Рис. 1. Функциональные характеристики энергозащищённости объекта в зимний период [а — линии поля скорости воздушного потока вблизи поверхности модели; б — распределение температуры на внешней поверхности модели и в срединных сечениях, перпендикулярных плоскостям двери и окна; в — распределение температуры по толщине дверного блока; г — то же для оконного блока; д — распределение температуры в перпендикулярных сечениях дверного стеклопакета через центр и угловые точки; е — то же для оконного стеклопакета]

энергии турбулентности и давления воздуха на элементы модели, что дало возможность оценить влияние ветровой конвекции на функциональные характеристики энергозащищённости дверей и окон объекта, выступающих в данном случае как тепловые мосты, а также оценить аэродинамические характеристики поверхности модели и затем выполнить акустический анализ помещения и определить действующие нагрузки на элементах модели.

На втором этапе моделирования определяются функциональные характеристики энергозащищённости модели объекта.

На рис. 1б показано распределение температуры на внешней поверхности модели при обтекании воздушными потоками и в срединных сечениях, перпендикулярных плоскостям двери и окна.

Видно, что верхняя и боковые поверхности переднего и бокового теплоизоляционных блоков в целом имеют температуру, близкую к -10°C , что соответствует начальной температуре воздушного потока, но она может понижаться до $-10,3^{\circ}\text{C}$ за счёт ветровой конвекции. В то же время на поверхностях двери и окна, и в зонах, примыкающих к ним, температура выше: до $-9,8^{\circ}\text{C}$.

Это, видимо, вызвано снижением ветровой конвекции в этих зонах поверхности, а также возможными потерями тепла через них, что подтверждает наличие тепловых мостов в конструкциях двери и окна. Более детально оценить влияние дверного и оконного блоков как тепловых мостов на энергозащищённость помещения модели позволяют следующие рисунки.

На рис. 1в показано распределение температуры по толщине дверного блока. Видно, что температура на поверхности стекла, обращённой внутрь помещения, поддерживается около $+18...+19^{\circ}\text{C}$ и в верхней части достигается максимальное значение $+19,6^{\circ}\text{C}$. Среди всех конструктивных элементов, обрамляющих стеклопакет, температура значительно ниже на внутренней поверхности рамы: $+11...+12^{\circ}\text{C}$ против $+14...+15^{\circ}\text{C}$ на внутренней поверхности граничащего с рамой дверного каркаса. Далее по толщине стеклопакета температура всех элементов снижается, так что внешняя сторона стекла дверного блока имеет температуру от $-10...-9^{\circ}\text{C}$ в верхней половине стеклопакета до $-2,2^{\circ}\text{C}$ в средней зоне нижней половины. В то же время на верхней кромке рамы температура может достигать $-10,5^{\circ}\text{C}$, что вызвано повышенной ветровой конвекцией, отмеченной также и на рис. 1а–б. Но на нижней части внешней стороны рамы и дверного каркаса температура может принимать положительные значения до $+5...+6^{\circ}\text{C}$, что объясняется отсутствием ветровой конвекции на уровне земли и утечкой тепла через дверь.

На рис. 1г показано распределение температуры по толщине оконного блока. Видно, что температура на поверхности стекла, обращённой внутрь помещения, также около $+18...+19^{\circ}\text{C}$ с максимальным значением $+19,7^{\circ}\text{C}$ в верхнем углу. Но на внутренней поверхности оконной рамы температура значительно ниже: $+11...+12^{\circ}\text{C}$, а на внутренней поверхности граничащего с рамой оконного каркаса несколько выше: $+14...+15^{\circ}\text{C}$. Далее по толщине стеклопакета температура снижается до $-10...-9^{\circ}\text{C}$ на внешней стороне оконного стекла, рамы и каркаса с минимальным значением $-10,3^{\circ}\text{C}$. Но в середине окна находится область повышенной температуры: от $-7...-6^{\circ}\text{C}$ на поверхности стекла и до $+4...+5^{\circ}\text{C}$ на поверхности рамы и каркаса. Это вызвано как низкой конвекцией в области окна (оконный блок утоплен внутрь стены), так и возможной утечкой тепла.

На рис. 1д дано распределение температуры в перпендикулярных сечениях дверного стеклопакета через центр (синяя линия), левый верхний угол (зелёная



линия) и левый нижний угол (красная линия). На стороне стекольного листа, обращённой внутрь помещения, температура может принимать значения $+13,8$; $+2,3$ и $+7^{\circ}\text{C}$, соответственно. Низкие температуры угловых сечений объясняются отсутствием прямого контакта стекла с тёплым воздухом (углы стеклопакета заключены в раму). Температура воздуха межстекольного пространства резко падает от примерно $+13,6^{\circ}\text{C}$ до $-8,4^{\circ}\text{C}$ на внутренней стороне второго листа стеклопакета в центральном сечении (синяя линия), но незначительно изменяется для угловых сечений: от примерно $+1,8^{\circ}\text{C}$ до $-1,5^{\circ}\text{C}$ (зелёная линия) и от примерно $+6,6^{\circ}\text{C}$ до $+4,8^{\circ}\text{C}$ (красная линия). Значения температуры на внешней стороне стеклопакета во всех случаях лишь немногим ниже: $-8,6$; $-1,8$ и $4,3^{\circ}\text{C}$, соответственно.

Анализ распределения температуры в дверном и оконном блоках показывает, что температура, близкая к установленной в помещении ($+20^{\circ}\text{C}$), сохраняется лишь на части внутренней поверхности стеклопакетов двери и окна, не закрытой рамой

Таким образом, более значительный перепад температур в межстекольном пространстве и лучшие теплоизоляционные свойства стеклопакета отмечаются в незакрытых рамой элементах. Утечка тепла через раму означает, что её элементы образуют тепловой мост с окружающей средой, а разница температурных режимов верхней и нижней части дверного блока объясняется различными условиями ветровой конвекции.

На рис. 1е дано распределение температуры в перпендикулярных сечениях оконного стеклопакета через центр (синяя линия), левый верхний угол (зелёная линия) и левый нижний угол (красная линия). Видно, что распределение температуры в центре стеклопакета оконного блока совпадает с аналогичным для дверного стеклопакета (рис. 1д). В то же время распределения температуры через верхний и нижний угол смещены в область более низких температур: от примерно $+1,8^{\circ}\text{C}$

до $-2,2^{\circ}\text{C}$ (зелёная линия) и от $+3,6^{\circ}\text{C}$ до $+0,4^{\circ}\text{C}$ (красная линия) соответственно. Таким образом, в элементах стеклопакета, закрытых рамой, образуется тепловой мост с окружающей средой, а сближение температурных режимов верхней и нижней части оконного блока вызвано меньшим влиянием ветровой конвекции.

Анализ распределения температуры по толщине в дверном и оконном блоках показывает, что температура, близкая к установленной в помещении $+20^{\circ}\text{C}$, сохраняется лишь на части внутренней поверхности стеклопакетов двери и окна, не закрытой рамой. В области рамы температура снижена до $+11...+12^{\circ}\text{C}$.

На наружной поверхности стеклопакетов, а также на рамах и каркасах, имеются зоны повышенной температуры, что свидетельствует об утечке тепла. Различная локализация этих зон на рамах дверного и оконного блоков объясняется разными условиями ветровой конвекции. Это говорит о значительных потерях тепла из помещения через дверные и оконные блоки и подтверждает, что они действительно являются тепловыми мостами в данном объекте, существенно снижающими энергоэффективность помещения.

В то же время очевидно, что в рамках BIM-технологии предварительное моделирование инженерных задач позволяет оперативно выявлять неучтённые слабые стороны проектирования и проводить корректировку полученных решений до определения оптимального, и намечать возможные способы повышения энергосбережения объекта, например, использование в рамах дверных и оконных блоков материалов с более низкой теплопроводностью, а в стеклопакетах расширение межстекольного пространства и заполнение его инертным газом. Положительно может сказаться на энергосбережении помещения и установка ограждающих средств на пути ветровых потоков. Но это требует дополнительных исследований.

Дальнейшее исследование функциональных характеристик дверей и окон данного объекта связано с переходом от аэродинамического моделирования воздействующих на него воздушных потоков к вибрационному и акустическому анализу и оценке нагрузки на поверхностных элементах. Этот этап исследования основан на применении метода крупных вихрей (LES) [3, 5–7] для расчёта аэродинамических сил, действующих на конструктивные элементы поверхности. На данном этапе результаты стационарного RANS-моделирования используются в качестве начальных условий для метода LES во временной области.

Моделировалось воздействие ветрового потока на объект в течение 1,2 с. Поскольку входная граница воздушного домена расположена достаточно близко к фронтальной поверхности объекта (на расстоянии 16,97 м), нормальная скорость потока U_N корректируется по так называемому закону $1/7$ степени профиля скорости турбулентных потоков [6], чтобы гарантировать, что массовая скорость потока эквивалентна той, что создаётся равномерной скоростью $U = 20$ м/с на входе:

$$U_N = U \left(\frac{z}{3,2H} \right)^{1/7} \left(1 - \frac{z}{3,2H} \right)^{1/7} \frac{1}{0,756},$$

где z — аппликата; H — высота объекта (4,138 м). Стабилизация течения наступает, когда воздушный поток проходит 16,97 м и достигает передней кромки поверхности. Детальное моделирование с шагом $\Delta t = 0,005$ с выполнено на интервале от 0,8 до 1,2 с. Результаты воздействия воздушных потоков на элементы дверного блока во временном и частотном интервалах показаны на рис. 2.

На рис. 2а показаны величины сил ветрового давления на внешней поверхности дверного блока (синяя линия) и оконного блока (зелёная линия) в зависимости от времени. Видно, что в первом случае величина силы ветрового давления в среднем на три порядка больше, что вызвано расположением двери на фронтальной поверхности, а окна на боковой, и соответствует характеру движения воздушных потоков вблизи поверхности объекта (рис. 1а). Поэтому дальнейшие исследования проведены только для дверного блока, что позволит в дальнейшем сократить затраты времени на получение объективной оценки по вопросам шумозащищённости помещений объекта в целом.

Видно, что на интервале до 0,5 с сила ветрового давления незначительно отклоняется от начального значения 330 Н, а затем по мере стабилизации потока быстро убывает до 250 Н с несколькими небольшими пульсациями на интервале от 0,8 до 1,2 с. Однако силовые пульсации в потоке воздуха вблизи поверхности двери могут быть вызваны также вязкими силами, выявление действия которых требует моделирования на более длительном промежутке времени.

При вибрационном и акустическом анализе элементов конструкции дверного блока важна частотная характеристика нагрузок, поэтому, как и в статье [3] данные о действии сил в воздушном потоке на интервале, где решения наиболее детализированы, переносятся из временной области в частотную с помощью быстрого преобразования Фурье. Для данной

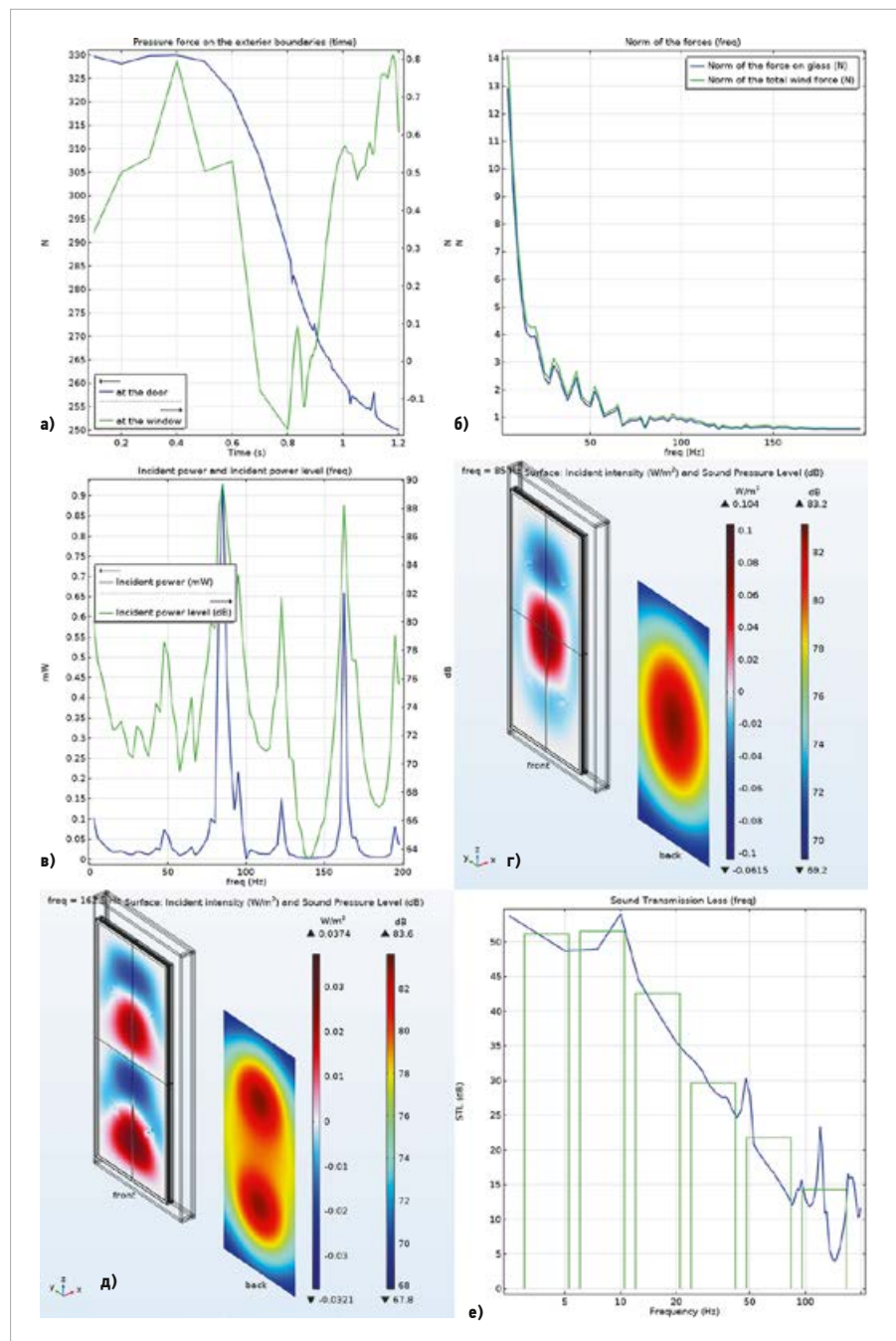
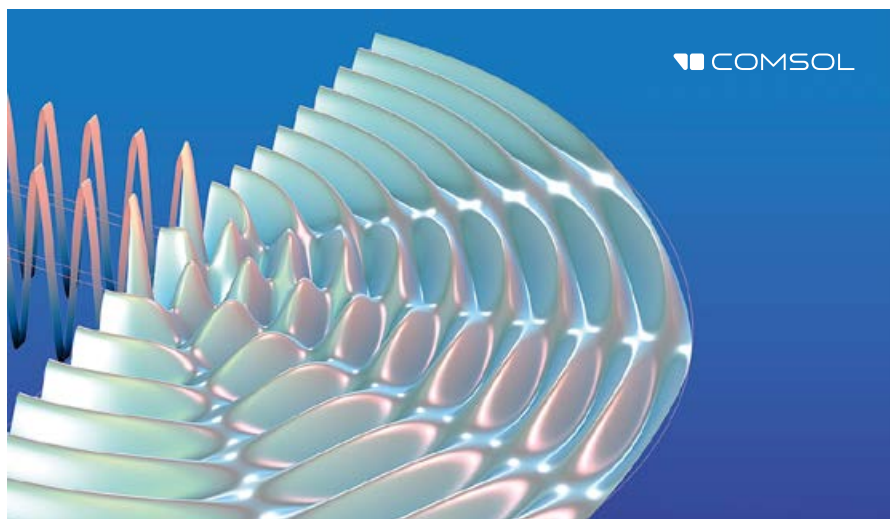


Рис. 2. Функциональные характеристики шумозащищённости дверного блока [а — величины сил ветрового давления на внешней поверхности дверного и оконного блоков; б — величины нормализованных полных сил на внешней поверхности дверного блока и на дверном стекле; в — распределение акустической мощности и её уровня на внешней поверхности дверного блока; г — распределение интенсивности звука на внешней поверхности дверного блока и уровня передаваемого звукового давления для 85 Гц; д — то же для 162,5 Гц; е — уровень потерь при передаче звука через дверной блок]

выборки от 0,8 до 1,2 с периодом $T = 0,4$ с разрешение в частотной области составит $D_f = 1/T = 2,5$ Гц, а максимальная частота $F_{\max} = 1/\Delta t = 200$ Гц. При этом в интерфейсе LES в пристеночной области учитываются силы трения, что позволяет вычислить вязкую силу и добавить её к силе давления. Напряжения в потоке жидкости, вызванные суммарной силой, преобразуются в экструдируемые напряжения на элементах дверного блока согласно [7] как решения уравнений в слабой форме.

На рис. 2б показаны величины нормализованных полных сил, действующих на всей внешней поверхности дверного бло-

ка (зелёная линия), и только на дверном стекле (синяя линия) в диапазоне частот 5–200 Гц. Видно, что силы незначительно различаются по величине и на малых частотах быстро убывают. На интервале от 20 до 140 Гц обе силы убывают с одинаковыми пульсациями, наибольшие из которых на частотах 30; 42,5; 55; 67,5 и 80 Гц. Далее на интервале до 200 Гц величины сил и их пульсации минимальны. Следовательно, резонансные явления в элементах дверного блока могут возникать в диапазоне от 20 до 140 Гц и для их подтверждения необходимо найти собственные частоты конструкции. Но известно, что



стеклопакет образует колебательную систему двух стёкол с упругой связью через воздух. Резонансная частота этой системы определяется действием звуковой волны, проходящей через стеклопакет, и находится в интервале от 200 до 300 Гц в зависимости от толщины стекла [8]. Поэтому дальнейшее моделирование должно включать акустический анализ в частотной области в связке интерфейсов Solid Mechanics и Pressure Acoustics, Frequency Domain.

Ранее в статье [2] диффузное звуковое поле и его отражения на стороне источника определялось как совокупность N плоских волн со случайным направлением и случайной фазой и соответствующих отражённых волн, а нагрузка на конструкцию вычислялась как их нормированная алгебраическая сумма. Применение метода LES позволяет прикладывать найденную ветровую нагрузку на элементах дверного блока как давление p , создаваемое звуковым полем.

Важной интегральной характеристикой этого поля является акустическая мощность W [Вт] и её уровень L_W [дБ(А)]:

$$L_W = 10 \lg(W/W_0), \text{ где } W_0 = 10^{-12} \text{ Вт.}$$

Акустическая мощность определяет полную акустическую энергию, излучаемую в единицу времени, причём низкочастотный звук (в рассматриваемом интервале до 200 Гц) обладает большей мощностью и оказывает более значительное акустическое давление на стеклопакет. На рис. 2в приведено распределение акустической мощности, приложенной к внешней поверхности дверного блока (синяя линия), и её уровня (зелёная линия) в зависимости от частоты. На графике наряду с небольшими пульсациями выделяются несколько пиков их величин: на частотах 85; 95; 122,5; 162,5 и 195 Гц. Наибольшие значения достигаются на частотах 85 Гц: $W = 0,93$ мВт, $L_W = 89,6$ дБ(А) и 162,5 Гц: $W = 0,66$ мВт, $L_W = 88,5$ дБ(А). Для этих

частот следует проверить характеристики шумозащищённости объекта и механической устойчивости.

Мощность звукового поля при прохождении через препятствие снижается за счёт потерь и новой характеристикой звука на выходе может служить передаваемая мощность W_{tr} [Вт]. Также наглядной величиной является уровень звукового давления или громкость звука L_p [дБ(А)], которая определяется по формуле:

$$L_p = 20 \lg(p/p_0),$$

где p_0 — опорный уровень давления, равный 2×10^{-5} Па. Громкость звука непосредственно воспринимается человеком, поэтому именно её величина нормируется стандартами по защите от шума [9].

На рис. 2г приведено распределение интенсивности звука, падающего на внешнюю поверхность дверного блока и уровня звукового давления, передаваемого при прохождении звука через дверной блок, для 85 Гц. Видно, что наибольшая интенсивность привходящего звука сосредоточена в центральной зоне внешнего стекла с величиной около 0,1 Вт/м², а выше и ниже имеются области отрицательной интенсивности до -0,062 Вт/м², что соответствует волновому характеру звукового воздействия. При этом звуковое давление на выходе имеет круговое распределение, но с концентрическими зонами и на большей площади за счёт рассеяния на элементах дверного блока. Максимальная громкость звука 83,2 дБ(А) против 89,6 дБ(А) на входе снизилась на

Акустическая мощность определяет полную акустическую энергию, излучаемую в единицу времени, причём низкочастотный звук обладает большей мощностью и оказывает большее акустическое давление

7,14 % что является недостаточным показателем звуковой комфортности.

На рис. 2д показано распределение интенсивности входящего звука на внешней поверхности дверного блока, и уровня звукового давления после прохождения через дверной блок для 162,5 Гц. Видно, что наибольшая интенсивность звука приходится на две области, несимметрично смещённые вверх и вниз от центра внешнего стекла с максимальной величиной 0,04 Вт/м², а зоны отрицательной интенсивности до -0,032 Вт/м² между ними и выше. Звуковое давление на выходе также сохраняет волновой характер распределения с двумя концентрическими областями сверху и снизу от центра стекла и максимальной величиной 83,6 дБ(А). Это снижение максимальной громкости звука на 5,54 % по сравнению с 88,5 дБ(А) на входе незначительно.

Шумозащищённость объекта можно количественно представить как уровень потерь при звукопередаче через ограждающую конструкцию Sound Transmission Loss [дБ(А)], который определяется как

$$STL = 10 \lg(W_{in}/W_{tr}),$$

где W_{in} — полная мощность, падающая на конструкцию; W_{tr} — общая передаваемая мощность. На рис. 2е даны графики STL для дверного блока как функции частоты в диапазоне от 5 до 200 Гц в непрерывном спектре (синяя линия) и усреднённом по октавам (зелёная линия). Видна неравномерность STL на низких частотах: при убывании значений в среднем присутствуют пики на частотах 10; 47,5; 95; 120 и 175 Гц и провал на частоте 145 Гц. Таким образом, корреляция с пиковыми частотами акустической мощности на внешней поверхности дверного блока (рис. 2в) практически отсутствует.

Это значит, что неравномерность STL вызвана преимущественно внутренними причинами: неоднородностью структуры дверного блока и резонансными явлениями на них. Частота 145 Гц является резонансной для колебательной системы «стекло — воздух — стекло». Известно, что звукоизоляция может ухудшаться в частотной области между этой резонансной частотой и резонансными частотами отдельных листов стекла [8], но в данном исследовании частоты выше 200 Гц не рассматриваются. Шумозащищённость быстро падает на малых частотах, но может стабилизироваться на уровне 15–20 дБ(А), что также требует исследования на большем интервале частот. Функциональные характеристики дверного блока зависят также от собственных частот и возможного их совпадения с найденными пиковыми частотами STL .

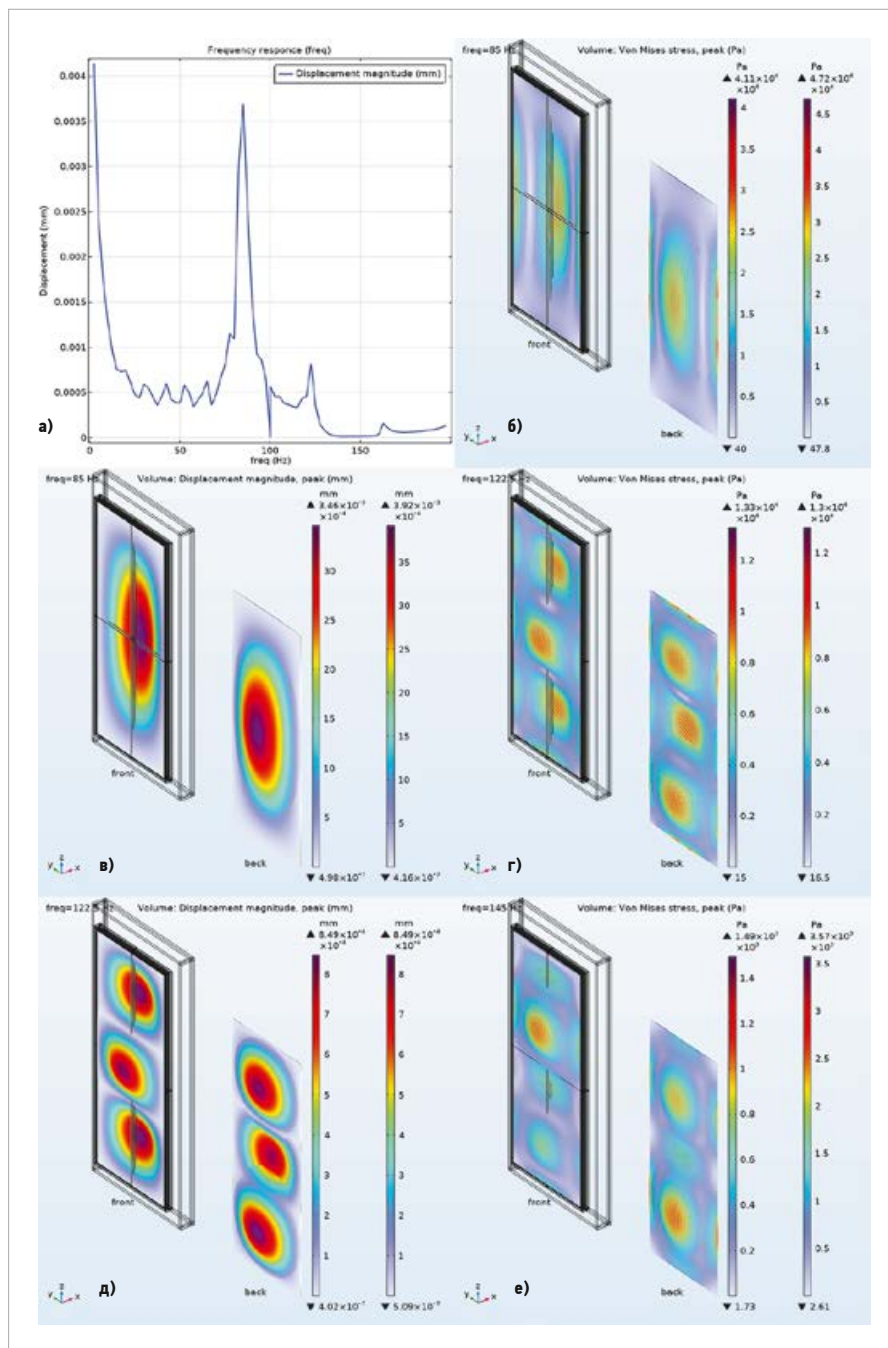
На последнем этапе в исследовании Eigenfrequency определяются собственные частоты дверного блока. Граничные условия задачи состоят в фиксации дверного каркаса на поверхности стенного блока. В системе предполагается демпфирование с коэффициентом гистерезисных потерь, зависящим от материала деталей дверного блока. Первые шесть собственных частот равны 85,26; 88,33; 95,86; 98,89; 123,31 и 126,39 Гц.

Результаты частотного отклика конструкции дверного блока на приложенные гармонические нагрузки показаны на рис. 3 для двух характерных частот. Чтобы определить эти характерные частоты, необходимо по результатам акустического анализа в частотной области построить кривую частотного отклика для некоторого элемента конструкции. Пики на этой кривой определяются ближайшими собственными резонансными частотами системы. На рис. 3а дана кривая частотного отклика для средней величины смещения стёкол в перпендикулярном сечении дверного стеклопакета через центр.

Граничные условия задачи состоят в фиксации дверного каркаса на поверхности стенного блока. Предполагается демпфирование с коэффициентом гистерезисных потерь, зависящим от материала деталей дверного блока

На кривой выделяются пики на частотах 85 и 122,5 Гц, которые близки к двум из собственных частот дверного блока, найденным ранее. Кроме того, частота 85 Гц была найдена ранее как пиковая для акустической мощности, приложенной к внешней поверхности дверного блока, а среди пиковых частот STL есть близкая частота 120 Гц. Таким образом, в системе определяются две моды, для которых можно провести анализ напряжений и деформаций элементов дверного блока.

На рис. 3б приведено распределение напряжения по Мизесу на наружном и на внутреннем стекле дверного стеклопакета при нагрузке на частоте 85 Гц. Оно имеет волновой характер с областью максимальных значений в центральном овале и фрагментах подобных овалов вдоль боковых краёв, что обусловлено длиной волны и размерами стекла. При этом напряжения на внутреннем стекле выше с максимумом $4,72 \times 10^4$ Па против $4,11 \times 10^4$ Па на внешнем. Это объясняется пиком акустической мощности на данной частоте и, соответственно, повышенным акусти-



•• Рис. 3. Результаты частотного отклика дверного блока на приложенные гармонические нагрузки [а — кривая частотного отклика для средней величины смещения стёкол стеклопакета в перпендикулярном сечении через центр; б — распределение напряжения по Мизесу на стёклах (в увеличенном масштабе) для частоты 85 Гц; в — деформация стёкол (в увеличенном масштабе) для той же частоты; г — распределение напряжения по Мизесу на стёклах для частоты 122,5 Гц; д — деформация стёкол для той же частоты; е — распределение напряжения по Мизесу на стёклах для частоты 145 Гц]

ческим давлением, передаваемым через внутреннее стекло на резонансной частоте.

На рис. 3в в увеличенном масштабе показана деформация стёкол стеклопакета при нагрузке на частоте 85 Гц. Распределение концентрическое с областью максимальных значений в центре. Наружное стекло стеклопакета деформируется с максимумом $3,46 \times 10^{-3}$ мм, а деформации внутреннего стекла больше, с максимумом $3,92 \times 10^{-3}$ мм. Это также вызвано совпадением пика акустической мощности с собственной резонансной частотой.

На рис. 3г дано распределение напряжения по Мизесу на стёклах дверного

стеклопакета при нагрузке на частоте 122,5 Гц. Его волновой характер проявляется во фрагментированной области максимальных значений: три овала соответствуют максимумам амплитуды звуковой волны, приходящей на внешнюю поверхность. При этом напряжения на внешнем стекле немного выше с максимумом $1,33 \times 10^4$ Па против $1,3 \times 10^4$ Па на внутреннем. Это объясняется снижением акустического давления на данной частоте при высоком уровне STL.

На рис. 3д в увеличенном масштабе показана деформация стёкол дверного стеклопакета при нагрузке на частоте 122,5 Гц.



Распределение аналогично рис. 3г. Хорошо видно чередование выпуклых и вогнутых зон на поверхности стёкол, повторяющее профиль волны. Деформации наружного и внутреннего стекла одинаковы с максимумом $8,49 \times 10^{-4}$ мм, что объясняется устойчивостью колебаний: резонанс не наступает при высоком значении STL .

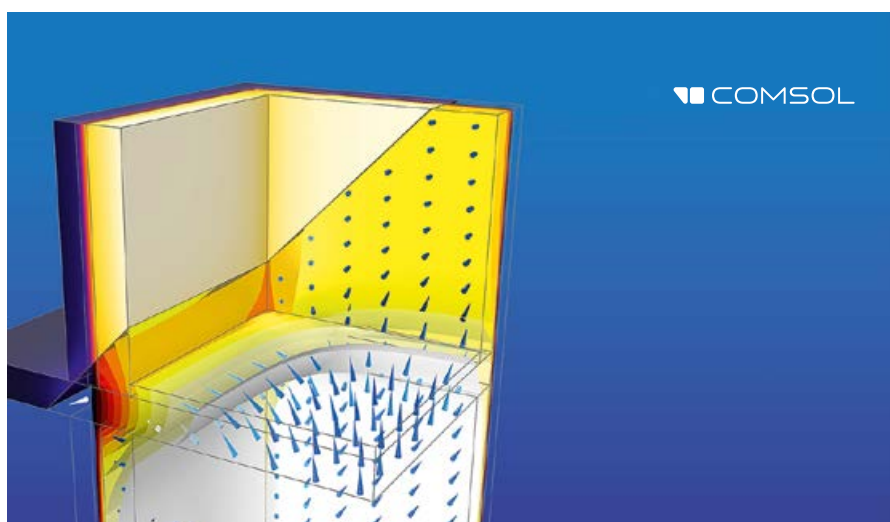
Для сравнения на рис. 3е показано распределение напряжения по Мизесу на стёклах при нагрузке на частоте 145 Гц, резонансной для системы «стекло — воздух — стекло». Отличительной его особенностью является несимметричность: на наружном стекле область максимальных значений смещена вверх, а на внутреннем — вниз от центра. При этом напряжения на внутреннем стекле выше с максимумом $3,57 \times 10^3$ Па против $1,49 \times 10^3$ Па на внешнем. Аналогично выглядит и распределение деформации с максимумом $2,64 \times 10^{-4}$ мм на нижней половине внутреннего стекла. Несимметричность распределений напряжения и деформации вызвана нецелым отношением длины волны и межстекольного расстояния.

Заключение

1. Проведённое моделирование функциональных характеристик дверных и оконных блоков социальных объектов при совместном влиянии температуры и ветровой конвекции внешней среды в [COMSOL Multiphysics](#) показало широкие возможности данного ПО при исследовании физических процессов в ограждающих строительных конструкциях.
2. При исследовании разработанной модели изначально предполагалось, что блоки входной двери и окна являются тепловыми мостами, влияющими на энергоэффективность помещения. Конвективный теплообмен в неизотермическом турбулентном потоке воздуха моделировался как два последовательных этапа решения в интерфейсах Turbulent Flow, $k-\epsilon$ и Heat Transfer in Solids and Fluids, что позволило определить характеристики ветровой конвекции на элементах поверхности модели и функционально связать со значениями внешней температуры на них.
3. По характерным зонам ветровой конвекции на поверхности исследуемой мо-

дели определена температура внутри помещения и в срединных сечениях, перпендикулярных плоскостям двери и окна, выступающих как тепловые мосты, влияющие на энергозащищённость помещения. Также получено распределение температуры в конструктивных элементах дверных и оконных блоков, отражающее вклад каждого из них в тепловые потери блоков в целом.

4. Комплексное моделирование и исследование объекта методами стационарного RANS- и LES-моделирования во временной области динамики воздушных потоков в зоне расположения модели позволяет определить и визуализировать их функциональные характеристики по параметрам скорости (конвективной активности), кинетической энергии турбулентности и воздушного давления на элементы модели, что даёт возможность оценить качество аэродинамических характеристик поверхности модели, проводить акустический анализ помещения и действующих нагрузок на элементах модели.
5. Результаты проведённого исследования объекта показали, что в рамках ВІМ-технологии предварительное моделирование инженерных задач позволяет оперативно выявлять неучтённые слабые стороны проектирования и проводить своевременную корректировку полученных решений, а использование метода унификации конструктивных элементов объекта на этапе предпроектных исследований — снижать объём необходимых исследований. ●



1. Султангузин И.А., Кругликов Д.А., Яцюк Т.В., Калыкин И.Д., Яворовский Ю.В., Бартенев А.И., Говорин А.В., Жигулина Е.В., Хромченков В.Г. Применение ВІМ-, ВЕМ- и CFD-технологий для проектирования, строительства и эксплуатации энергоэффективного дома // Журнал СОК, 2019. №3. С. 36–42.
2. Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Моделирование в COMSOL Multiphysics функциональных характеристик окон зданий ЖКХ // Журнал СОК, 2020. №11. С. 56–63.
3. Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Моделирование и исследование в COMSOL Multiphysics функциональных характеристик объектов социальной инфраструктуры // Журнал СОК, 2022. №11. С. 19–25.
4. ГОСТ 24866–2014. Стеклопакеты клееные. Технические условия / Дата введ.: 01.04.2016.
5. Математическое (численное) моделирование ветровых нагрузок и воздействий: Метод. пособие / Минстрой России. — М.: ФАУ «ФЦС», 2020. 61 с.
6. Large eddy simulation of a 3D hill geometry. COMSOL Multiphysics User's Guide. Web-source: comsol.com. Access date: December 26, 2022.
7. Fluid-structure interaction on a sports car door. COMSOL Multiphysics User's Guide. Web-source: comsol.com. Access date: December 26, 2022.
8. Звукоизоляция и звукопоглощение: учебное пособие / Л.Г. Осипов, В.Н. Бобылев, Л.А. Борисов и др. — М.: АСТ; Астрель, 2004. 450 с.
9. ГОСТ Р 56769–2015 (ИСО 717–1:2013). Здания и сооружения. Оценка звукоизоляции воздушного шума / Дата введ.: 01.06.2016.

References — see page 109.

Modeling in COMSOL Multiphysics of the functional characteristics of doors and windows of social infrastructure facilities. Pp. 20–27.

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 \(RGUTS\)](#), dp. Cherkizovo, Moscow region)

1. I.A. Sultanguzin, D.A. Kruglikov, T.V. Jacjuk, I.D. Kaljakin, Ju.V. Javorovskij, A.I. Bartenev, A.V. Govorin, E.V. Zhigulina, V.G. Hromchenkov. *Primenenie BIM-, BEM- i CFD-tehnologij dlja proektirovaniya, stroitelstva i jekspluatatsii jenergoeffektivnogo doma* [Application of BIM-, BIM- and CFD-technologies for design, construction and operation of an energy-efficient house]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2019. No. 3. Pp. 36–42. [In Russian]
2. V.A. Suchilin, A.S. Kochetkov, N.N. Gubanov. *Modelirovanie v COMSOL Multiphysics funkcional'nykh harakteristik okon zdaniy ZhKH* [Modeling in COMSOL Multiphysics of the functional characteristics of windows in housing and communal services buildings]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2020. No. 11. Pp. 46–53. [In Russian]
3. V.A. Suchilin, A.S. Kochetkov, N.N. Gubanov. *Modelirovanie i issledovanie v COMSOL Multiphysics funkcional'nykh harakteristik ob#ektov sotsial'noj infrastruktury* [Modeling and research in COMSOL Multiphysics of the functional characteristics of social infrastructure facilities]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2022. No. 10. Pp. 22–28. [In Russian]
4. GOST [State Industry Standard of Russia] No. 24866–2014. *Steklopakety klejonye. Tehnicheskie usloviya* [Glued double-glazed windows. Specifications]. Date of init.: April 1, 2016. [In Russian]
5. *Matematicheskoe (chislennoe) modelirovanie vetrovykh nagruzok i vozdeystvij: Metod, posobie* [Mathematical (numerical) modeling of wind loads and impacts: A methodological manual]. Moscow. *Minstroy Rossii* [Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation]; *FAU "FTsS"* ["Federal Center for Rationing, Standardization and Technical Conformity Assessment in Construction" Federal Autonomous Institution]. 2020. 61 p. [In Russian]
6. Large eddy simulation of a 3D hill geometry. COMSOL Multiphysics User's Guide. Web-source: comsol.com. Access date: December 26, 2022.
7. Fluid-structure interaction on a sports car door. COMSOL Multiphysics User's Guide. Web-source: comsol.com. Access date: December 26, 2022.
8. L.G. Osipov, V.N. Bobylev, I.A. Borisov et al. *Zvukoizolyatsiya i zvukopogloshhenie: ucheb, posobie* [Sound insulation and sound absorption: A textbook]. Moscow. *AST* ["AST" Publishers]; *Astrel* ["Astrel" Publishers]. 2004. 450 p. [In Russian]
9. GOST R 56769–2015 (ISO 717–1:2013) [State Industry Standard of Russia No. 56769–2015 (ISO 717–1:2013)]. *Zdaniya i sooruzheniya. Ocenka zvukoizolyatsii vozdušnogo shuma* [Buildings and constructions. Evaluation of sound insulation of airborne noise]. Date of init.: June 1, 2016. [In Russian]