

Имитационное моделирование тепловлажностного состояния ограждающих конструкций зданий с вентилируемым фасадом в COMSOL Multiphysics

Рецензия эксперта на статью получена
30.09.2024 [The expert review of the article
was received on September 30, 2024]

В городе Луганске весь жилой фонд в основном был построен по типовым проектам с использованием норм СССР. В условиях постоянной модернизации строительных норм и стандартов становится актуальным исследование в области утепления и модернизации жилых и гражданских зданий. Ключевым моментом в этом процессе является разработка оптимизированных решений для повышения энергоэффективности, которые позволят не только улучшить комфорт проживания, но и сократить затраты на отопление и обслуживание.

Инновационные технологии, направленные на утепление фасадов и улучшение внутренних условий, включают в себя как традиционные методы, так и применение новейших материалов и технических решений. Это предполагает выбор наиболее подходящих систем повышения энергосберегающей способности строений, учитывающих как особенности конкретного здания, так и климатические условия региона. Это особенно актуально для многоквартирных зданий [1–8].

Для успешной реализации данных технологий необходимо активно сотрудничать с научными учреждениями и экспертами в области строительной науки. Практические испытания новых материалов и систем дадут возможность проверить их эффективность в различных условиях эксплуатации, что, в свою очередь, позволит создать единые стандарты для дальнейшего применения.

Применение современных технологий, таких как технология информационного моделирования зданий (Building Information Modeling, BIM), делает процесс планирования ремонта и реконструкции зданий более точным. Такие инструменты позволяют визуализировать конечный

результат ещё до возведения здания в эксплуатацию или до окончания проведения работ по реконструкции.

Внедрение BIM-технологий в жилищно-коммунальное хозяйство предоставляет новые возможности для более глубокого анализа и управления энергетической эффективностью зданий [3, 5].

При создании эффективных технологий энергосбережения для зданий важно учитывать динамику теплообменных процессов, которые происходят в стенах при колебаниях внешних температур и влажности. Углублённое понимание поведения воздушных и водяных паров внутри конструкции позволяет точно выявить потенциальные проблемные зоны, где может возникнуть конденсат или лёд.

В рассматриваемой имитационной модели исследуется малоизученная проблема влияния одновременно тепла и влаги на функционирование ограждающей конструкции, состоящей из множества слоёв (внутреннего слоя цементно-песчаной штукатурки, существующей стены здания, слоя утеплителя, воздушной прослойки и внешнего защитного слоя в виде декоративной штукатурки). Такая модель представлена в виде фрагмента стены, соответствующей структуре теплового моста.

Программное обеспечение COMSOL Multiphysics успешно реализовывает различные задачи теплопроводности, создаёт точные модели узлов, генерацию расчётной сетки с достижением заданной точности результатов.

Предложенная методика определения тепло- и влажностного состояния ограждающих конструкций основывается на законе теплопроводности Фурье и на законах диффузии пара и влагопроводности в капиллярно-пористых средах.

УДК 69.05. Научная специальность: 2.1.3.

Имитационное моделирование тепловлажностного состояния ограждающих конструкций зданий с вентилируемым фасадом в COMSOL Multiphysics

О. А. Малыгина, старший преподаватель, Луганский государственный университет имени Владимира Даля (ЛГУ, г. Луганск)

Приведены результаты моделирования теплового и влажностного состояния фрагмента ограждающих конструкций при стационарном и нестационарном процессах эксплуатации. Оценка их эффективности была выполнена с учётом различных климатических условий, характерных для города Луганска. Полученные экспериментально физико-механические параметры материалов и коэффициентов переменных реализованы в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Построенная имитационная модель фрагмента стены с вентилируемым фасадом позволяет учитывать совместное влияние тепла и влаги на ограждающую конструкцию. Таким образом, результаты имитационного моделирования могут стать основой для дальнейших исследований и внедрения эффективных технологий в строительстве, направленных на улучшение микроклимата внутри помещений и защиту конструкций от негативных факторов внешней среды.

Ключевые слова: COMSOL Multiphysics, тепловлажностный режим, утеплители, тепловая изоляция, теплозащита зданий, тепловые потери.

UDC 69.05. The number of scientific specialty: 2.1.3.

Simulation modeling of the thermal and moisture state of the enclosing structures of buildings with a ventilated facade in COMSOL Multiphysics

O. A. Malygina, senior lecturer, Luhansk State University named after Vladimir Dahl (Lugansk city)

The article presents the obtained results of modeling the thermal and humidity state of a fragment of enclosing structures in stationary and non-stationary operation processes. The assessment of their effectiveness was carried out taking into account the different climatic conditions characteristic of the city of Lugansk. The experimentally obtained physical and mechanical parameters of materials and coefficients of variables are implemented in the COMSOL Multiphysics software package. The constructed simulation model of a fragment of a wall with a ventilated facade allows us to take into account the combined effect of heat and moisture on the enclosing structure. Thus, the results of simulation modeling can become the basis for further research and the introduction of effective technologies in construction aimed at improving the indoor microclimate and protecting structures from negative environmental factors.

Keywords: COMSOL Multiphysics, heat and humidity mode, insulation materials, thermal insulation, thermal protection of buildings, heat losses.

Согласно данной методике, количество сорбируемой материалом i -го слоя влаги будет определяться выражением:

$$W_{si} = A_1 \varphi_i + A_2 \varphi_i^2 + A_3 \varphi_i^3, \quad (1)$$

где A_1 , A_2 и A_3 — коэффициенты переменной, полученные по изотермам сорбции.

Относительная влажность на слое φ_1 определяет значение парциального давления в сечении слоя:

$$p_i = \varphi_i p_n = \varphi_i (0,0215 t_i^3 + 1,7 t_i^2 + 48,08 t_i + 613), \quad (2)$$

где p_n — атмосферное давление, Па; t_i — температура в слое.

Реализация предложенной модели для расчёта тепло- и влагопереноса в ограждающих конструкциях, выполнены с применением средств и функций пакета программ COMSOL Multiphysics 6.2.

Определение тепловых потерь, а также тепло- и влагорасчёты осуществлялись с использованием исходных данных: температура и относительная влажность воздуха внутри помещения $t_{in} = 21^\circ\text{C}$ и $\varphi_{in} = 60\%$; температура и относительная влажность наружного воздуха для города Луганска в январе месяце, согласно нормам, применяется при значениях $\varphi_{out} = 86\%$ $t_{out} = -10^\circ\text{C}$.

Для расчёта приняты значения физико-технических параметров материальных слоёв наружной ограждающей конструкции, которые получены экспериментальным путём (табл. 1).

С помощью COMSOL Multiphysics 6.2 была создана имитационная модель ограждающей конструкции, где с помощью интерфейсов Heat Transfer in Building Materials и Moisture Transport in Building Materials [8] был смоделирован совместный перенос тепла и влаги через ограждающую модель. При этом перенос влаги осуществлялся капиллярными силами, а перенос пара — с помощью диффузии.

Результатом проведённого компьютерного моделирования являются характеристики энергозащщённости в зависимо-

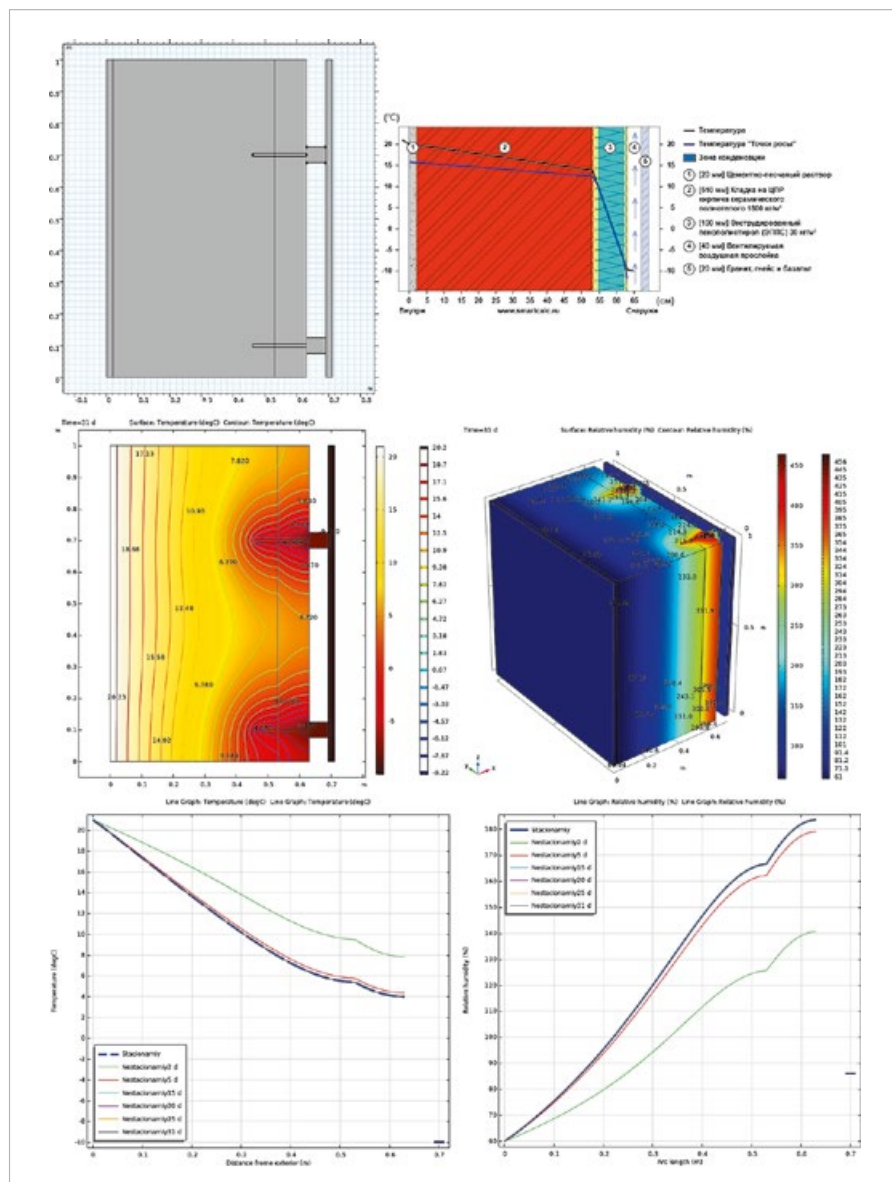


Рис. 1. Имитационная модель четырёхслойной ограждающей конструкции [а — схема ограждающей конструкции (ОК); б — теплотехнический расчёт ОК; в — изополя изменения температуры; г — изополя изменения влажности; д — график изменения температуры по толщине стены; е — график изменения влажности по толщине стены]

сти от условий эксплуатации, полученные при одновременном действии тепла и влаги внутри стены при нестационарном режиме работы ограждающей конструкции.

Фрагмент ограждающей конструкции стены, смоделированный в программном

обеспечении COMSOL Multiphysics 6.2, представлен на рис. 1а. Данная модель состоит из четырёх слоёв, характеристики которых заданы в табл. 1. Граничными условиями является температура и влажность внутри и снаружи конструкции.

Теплотехнические характеристики слоёв наружной ограждающей конструкции*

табл. 1

Параметры	Внутренняя штукатурка	Кирпичная кладка	«Пеноплекс Комфорт»	Воздушная прослойка	Гранитная плитка
Толщина слоя, м	0,02	0,51	0,10	н.д.	0,02
Плотность, кг/м ³	1800	1800	30	н.д.	2600
Теплоёмкость, кДж/(кг·°C)	0,84	0,88	1,0	н.д.	0,85
Коэффициент теплопроводности в сухом / влажном состоянии λ , Вт/(м ² ·°C)	0,76 / 0,93	0,70 / 0,81	0,0340 / 0,0348	н.д.	3,50
Коэффициент паропроницаемости μ , мг/(м·ч·Па)	0,09	0,10	0,013	н.д.	0,008
Коэффициент теплообмена поверхности ограждения с внутренним / наружным воздухом, Вт/(м ² ·°C)	8,7 / 23,0	8,7 / 23,0	8,7 / 23,0	н.д.	8,7 / 23,0
Коэффициенты переменной $A_1 / A_2 / A_3 / B_0 / B_1$	0,0121 / -0,0178 / 0,0158 / 0,0099 / 0,0062	0,0123 / -0,0180 / 0,0161 / 0,0238 / 0,0199	0,0245 / -0,0320 / 0,0260 / 0,000157 / -0,000198	н.д.	0,0127 / -0,0191 / 0,0169 / 0,0247 / 0,0210

* Данные таблицы получены экспериментальным путём.

Теплотехнический расчёт (рис.16) данной конструкции выполнен при помощи бесплатного теплотехнического онлайн-калькулятора SmartCalc. Как видно из графиков, в третьем слое появилась зона конденсации.

С помощью COMSOL Multiphysics 6.2 и с учётом исходных данных в табл.1 на рис.1в–е получены функциональные характеристики энергозащищённости ограждающей конструкции. Задача решалась как в стационарной, так и в нестационарной постановке при совместном влиянии тепла и влажности (расчёт произведён при 31 дне эксплуатации).

Как видно из графиков, со временем нестационарный режим переходит в стационарный. Графики при стационарном и нестационарном режимах имеют идентичную форму. В местах металлических анкеров (рис.1в–г) наблюдается повышение температуры с $-7,67$ до $-1,47^{\circ}\text{C}$, а значение влажности увеличивается с 171,6 до 435,6%. На графиках, представленных на рис.1д–е, в области утеплителя происходит резкие «скачки» температуры и влажности. Так, значение температуры падает с $+4$ до -10°C , а величина влажности уменьшается с 182 до 86%.

На рис.2 показаны графики изменения парциального давления и давления насыщенного водяного пара в сечении ограждающей конструкции. Как видно из рис.2, для модели, состоящей из четырёх слоёв, давление насыщенного пара на внутренней поверхности кирпичной стены равно 2505 Па. Далее в толще кирпичной стены наблюдается плавное уменьшение этого давления, и в месте воздушной прослойки происходит «скачок» с 800



к 263 Па. Парциальное давление в толще стены до наступления вентилируемой прослойки имеет постоянное значение 1440 Па, а в облицовочном слое оно падает до 212 Па.

Добавим ещё один слой теплоизоляционного материала «Пеноплекс» толщиной 150 мм (рис.3а) и проведём теплотехнический расчёт (рис.3б). Как видно из рис.3б, зона конденсации влаги переместилась во второй слой теплоизоляции. Проведём расчёт имитационной модели в COMSOL Multiphysics на совместное влияние тепла и влаги.

С помощью COMSOL Multiphysics и с учётом исходных данных получены функциональные характеристики энергозащищённости ограждающей конструкции. Задача решалась в стационарной и в нестационарной постановке при совместном влиянии тепла и влажности

Результаты моделирования, полученные при включении в геометрию второго слоя теплоизоляции, представлены на рис.3. Распределение температуры и относительной влажности по толщине конструкции (рис.3в–г) показывает, что значения температур по сравнению с рис.1 почти не изменились. А при распределении относительной влажности на графиках наблюдаются существенные различия. Так, относительная влажность растёт с 72 до 148% в слое кирпичной стены, а в слое теплоизоляционного материала относительная влажность возрастает до 230%, а после зоны воздушной прослойки — падает до 86%.

На рис.4 приведены графики распределения парциального давления и давления насыщенного пара в сечении ограждающей конструкции. Парциальное давление имеет постоянную величину 1440 Па вдоль толщины стены до начала вентилируемого зазора, потом резко падает до 212 Па. Давление насыщенного пара на границе внутреннего слоя стены равно 2505 Па. Потом наблюдается постепенное уменьшение до границы между первым и вторым утеплителями до 1050 Па, далее график уменьшается до 620 Па, где начинается вентилируемая прослойка, где он обрывается и продолжается в облицовочном слое с величиной 263 Па.

Заключение

В настоящее время в городе Луганске активно обновляются фасады массовых жилых зданий, проводятся ремонты и реконструкции внутренних помещений. Накопленный опыт обслуживания таких объектов свидетельствует о значительном потенциале для их модернизации при минимальных затратах. Для повышения энергоэффективности зданий критически важно учитывать характеристики теплообмена в стенах в условиях изменений температуры и влажности окружающей среды. В этой связи применяется компьютерное моделирование.

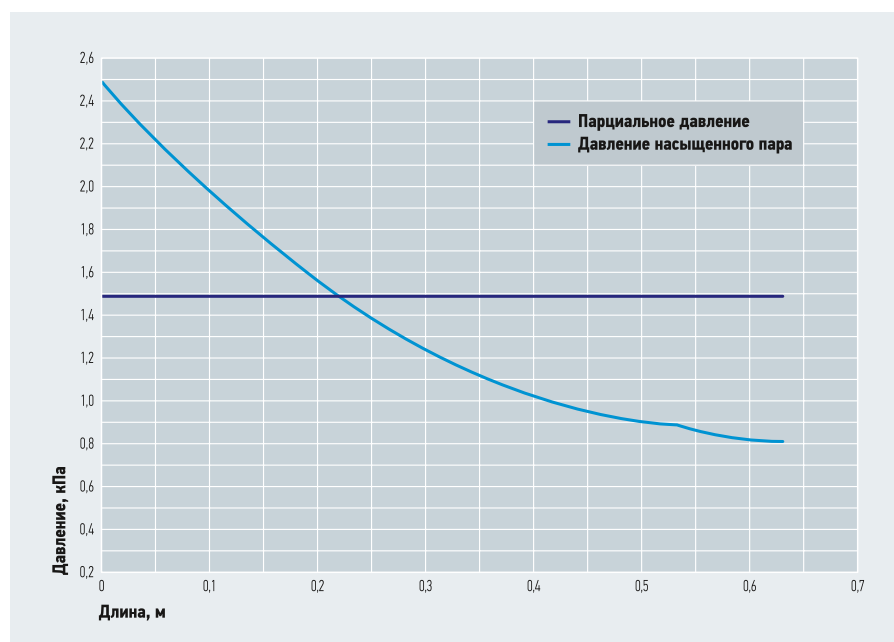


Рис. 2. Парциальное давление и давление насыщенных паров в многослойной ОК

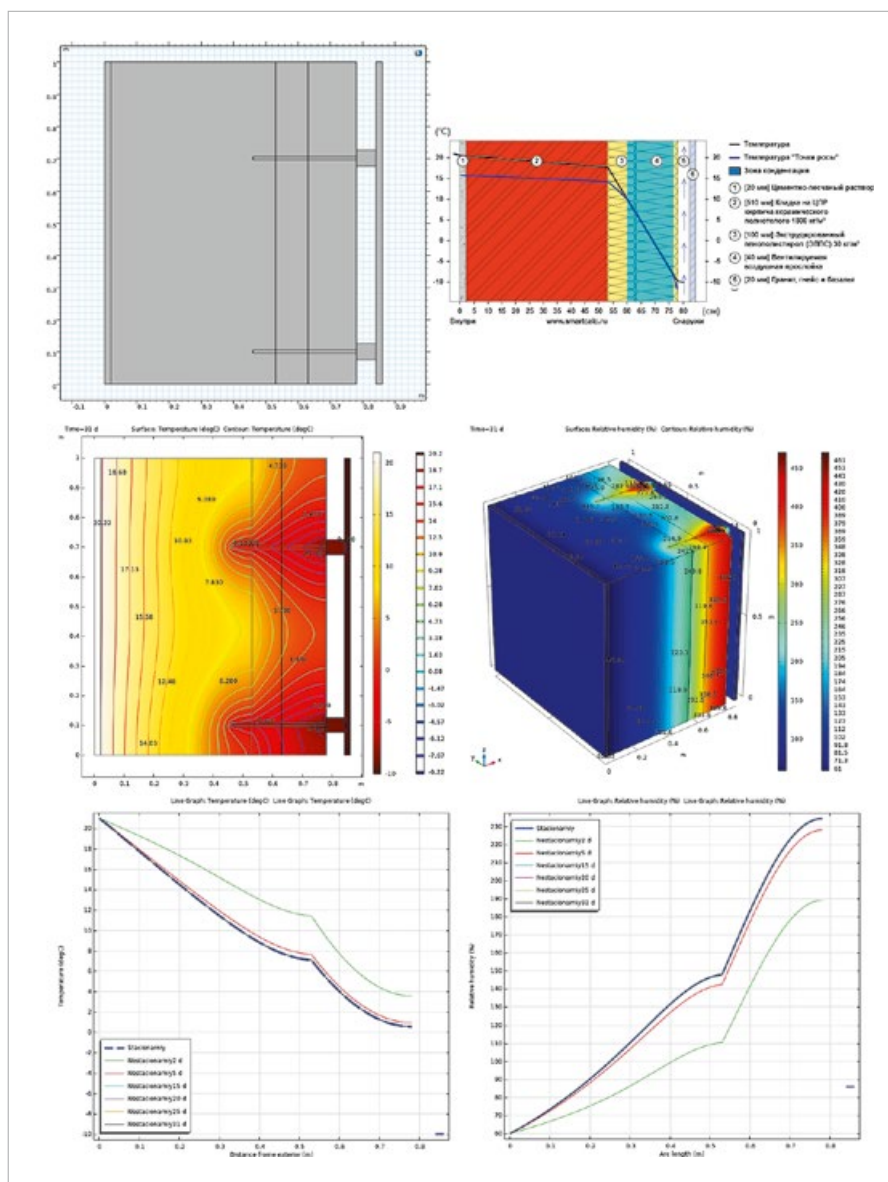


Рис. 3. Имитационная модель многослойной ограждающей конструкции с дополнительным слоем теплоизоляции [а — схема ограждающей конструкции (ОК); б — теплотехнический расчёт ОК; в — изополя изменения температуры; г — изополя изменения влажности; д — график изменения температуры по толщине стены; е — график изменения влажности по толщине стены]

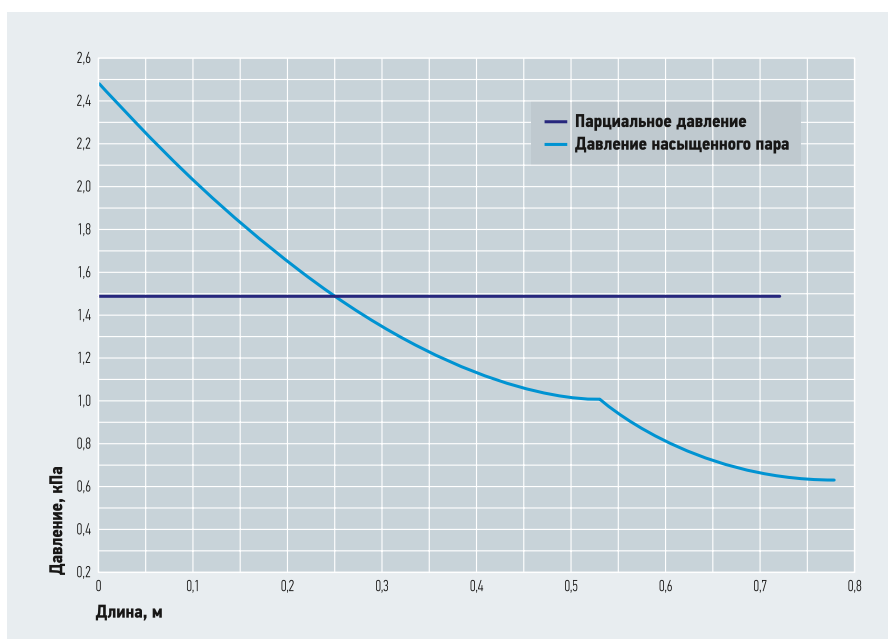


Рис. 4. Парциальное давление и давление насыщенных паров в слоях ограждающей конструкции с дополнительным слоем теплоизоляции

Разработанная методика, основанная на рассчитанных автором физико-механических характеристиках материалов конструктивных элементов и коэффициентах изотермической сорбции, была реализована в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Эта система позволяет более точно анализировать и предсказывать поведение зданий, что открывает новые горизонты для повышения их энергоэффективности и улучшения комфортных условий для проживания. Применение таких современных технологий значительно улучшает качество проводимых работ и обеспечивает устойчивое развитие городской инфраструктуры.

В данном исследовании проведена всесторонняя оценка тепло- и влагозащиты фрагмента ограждающей стеновой конструкции с вентилируемым фасадом. Получены функциональные характеристики энергозащищённости ограждающей конструкции с одним слоем теплоизоляционного материала и с двумя слоями при стационарном и нестационарном режимах. Как показал анализ, при увеличении интервала времени нестационарным процесс переходит в стационарный.

Анализ полученных результатов показал, что использование второго слоя теплоизоляции нецелесообразно, поскольку распределение температур по толщине стены носит идентичный характер, а значение влажности увеличивается из-за большей длины металлических анкеров вследствие того, что в местах их установки возникают «островки» холода.

1. ISO 10211:2017. Thermal bridges in building construction — Heat flows and surface temperatures. Edition 2. Detailed calculations. International Organization for Standardization (ISO). Publ.: June 2017.
2. СНиП 2.01.01.82. Строительная климатология и геофизика / Утв. постановлением Гос. комитета СССР по делам строительства от 21.07.1982 №188; дата введения 01.01.1984.
3. Парфёнов Г.И., Смирнов Н.Н., Яблоков А.А., Пыжов В.К. Имитационное моделирование прикладных задач тепло- и воздухообмена в программе COMSOL Multiphysics. — Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2023. 132 с.
4. Стаценко Е.А., Мусорина Т.А., Островая А.Ф., Ольшевский В.Я., Антуськов А.Л. Влагоперенос в вентилируемом канале с нагревательным элементом // Инженерно-строительный журнал, 2017. №2. С. 11–17.
5. 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.
6. Елохов А.Е. Методики и примеры расчёта тепловых мостов // Строительство и техногенная безопасность, 2015. №1. С. 86–93.
7. Сальников В.Б., Беляков В.А. Теплотехнические расчёты строительных конструкций с применением программного комплекса COMSOL Multiphysics. — Екатеринбург: Изд-во УрГУ, 2016. 48 с.
8. van Schijndel A.W.M., Schellen H.L. The use of COMSOL in teaching heat and moisture transport modeling in building constructions. Proc. of the COMSOL Conference. October 14–16, 2009. Milan, Italy. Pp. 32–41.

References — see page 80.

Simulation modeling of the thermal and moisture state of the enclosing structures of buildings with a ventilated facade in COMSOL Multiphysics. Pp. 60–63.

Oksana A. Malygina, senior lecturer, Luhansk State University named after Vladimir Dahl (Lugansk city)

1. ISO 10211:2017. Thermal bridges in building construction — Heat flows and surface temperatures. Edition 2. Detailed calculations. International Organization for Standardization (ISO). Publ.: June 2017; withdr.: January 30, 2018.
2. SNiP 2.01.01.82 [Building Rules & Regulations (National Codes and Standards of Russia) No. 2.01.01.82]. *Stroitel'naja klimatologija i geofizika* [Construction climatology and geophysics]. Utv. post.Gos. komiteta SSSR po delam stroitel'stva ot 21.07.1982 №188 [Approved by the Resolution of the USSR State Construction Committee No. 188 of July 21, 1982]. Date of impl.: January 1, 1984. [In Russian]
3. G.I. Parfenov, N.N. Smirnov, A.A. Yablokov, V.K. Pyzhov. *Imitatsionnoe modelirovanie prikladnykh zadach teplo- i vozdukhooobmena v programme COMSOL Multiphysics* [Simulation modeling of applied problems of heat and air exchange in the COMSOL Multiphysics program]. Ivanovo. *Izd-vo IGJeU* [Publishing House of Ivanovo State Power Engineering University (IGEU)]. 2023. 132 p. [In Russian]
4. E.A. Statsenko, T.A. Musorina, A.F. Ostrovaya, V.Ya. Olshevsky, A.L. Antus'kov. *Vlagoperenos v ventiliruemom kanale s nagrevatel'nym jelementom* [Moisture transfer in a ventilated duct with a heating element]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal* ["Civil Engineering Journal"]. 2017. No. 2. Pp. 11–17. [In Russian]
5. V.A. Suchilin, A.S. Kochetkov, N.N. Gubanov. *Modelirovanie v COMSOL Multiphysics jenergosberezhenija tipovykh zdaniy ZhKKh pri rekonstruktsii i remonte* [Modeling in COMSOL Multiphysics of energy saving of typical housing and communal services buildings during reconstruction and repair]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2020. No. 6. Pp. 44–50. [In Russian]
6. A.E. Elokhov. *Metodiki i primery raschjota teplovykh mostov* [Methods and examples of calculating thermal bridges]. *Stroitel'stvo i tekhnogennaja bezopasnost'* ["Construction and technogenic safety" Magazine]. 2015. No. 1. Pp. 86–93. [In Russian]
7. V.B. Salnikov, V.A. Belyakov. *Teplotekhnicheskie raschety stroitel'nykh konstruksij s primeneniem programmogo kompleksa COMSOL Multiphysics* [Thermal calculations of building structures using the COMSOL Multiphysics software package. Yekaterinburg]. Yekaterinburg. *Izd-vo UrGU* [Publishing House of the Ural State University (USU)]. 2016. 48 p. [In Russian]
8. A.W.M. van Schijndel, H.L. Schellen. The use of COMSOL in teaching heat and moisture transport modeling in building constructions. Proc. of the COMSOL Conference 2009. October 14–16, 2009. Milan, Italy. Pp. 32–41.