



Моделирование тепловлажност- ного состояния для углов зданий в нестационарном режиме в городе Луганске

Рецензия эксперта на статью получена
24.10.2024 [The expert review of the article
was received on October 24, 2024]

В Луганской Народной Республике (ЛНР) здания жилого и гражданского назначения практически в полном объёме были возведены по типовым проектам, соответствующим нормам проектирования, действовавшим на территории бывшего Советского Союза. Современные реалии требуют адаптации этих объектов к новым требованиям по тепловой защите, что приводит к необходимости утепления фасадов, а также ремонту и реконструкции помещений для создания комфортных условий проживания. Опыт применения технологий обслуживания таких объектов показывает их значительный потенциал для эффективной модернизации зданий при сравнительно низких затратах времени и ресурсов, что делает их актуальными в будущем.

С учётом вышеизложенного необходимо уже сейчас сосредоточиться на теоретических разработках и обоснованиях оптимизации технологий, направленных на обеспечение комфортного теплового режима в помещениях этих категорий зданий. Однако решение этих задач

усложняется значительным различием климатических условий в разных регионах Российской Федерации. Особенно это актуально для современных и ранее построенных многоэтажных зданий [1–9].

При разработке технологий по энергосбережению необходимо учитывать характеристики теплообменных процессов в конструктивных элементах зданий на фоне изменения внешней среды. Понимание свойств паровоздушной смеси, потенциальных зон конденсации и образования льда, а также правильный выбор утепляющих материалов позволят избежать появления сырости и плесени, продлевая срок службы зданий и обеспечивая комфортный микроклимат, что, в свою очередь, приведёт к снижению эксплуатационных расходов.

В данной модели анализируется недостаточно исследованный вопрос влияния одновременно температуры и влажности на работу многослойной ограждающей конструкции, состоящей из внутреннего слоя штукатурки, стены здания, теплоизоляционного слоя, который отделяет

УДК 69.05. Научная специальность: 2.1.3.

Моделирование тепловлажностного состояния для углов зданий в нестационарном режиме в городе Луганске

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

В статье представлены результаты имитационного моделирования тепловлажностного состояния ограждающих конструкций в нестационарном режиме работы на примере фрагмента угла стены реконструированного жилого дома в городе Луганске. В процессе исследования были получены физико-механические характеристики материалов, а также коэффициенты переменных параметров, которые были интегрированы в программный комплекс COMSOL Multiphysics. Выявлено, что разработанная имитационная модель эффективно учитывает комбинированное воздействие тепла и влаги на конструктивные элементы действующих зданий. Чтобы минимизировать негативное влияние влаги, была предложена концепция внедрения защитного барьера внутри конструкции стены. Исследование показало, что после определённого временного интервала времени нестационарный процесс тепло- и влагопереноса переходит в стационарный режим. Результаты исследования подчёркивают важность комплексного подхода к проектированию теплоизоляционных систем, что позволит обеспечить надёжность и эффективность функционирования современных зданий в долгосрочной перспективе.

Ключевые слова: теплозащита зданий, тепловлажностный режим, современная теплоизоляция, тепловые потери, COMSOL Multiphysics, защитный барьер.

UDC 69.05. The number of scientific specialty: 2.1.3.

Modeling of the heat and humidity state for the corners of buildings in non-stationary mode in the city of Lugansk

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

The article presents the results of simulation modeling of the thermal and moisture state of enclosing structures in a non-stationary mode of operation using the example of a fragment of a wall corner of a reconstructed residential building in the city of Lugansk. In the course of the study, the physical and mechanical characteristics of materials were obtained, as well as coefficients of variable parameters, which were integrated into the COMSOL Multiphysics software package. It is revealed that the developed simulation model effectively takes into account the combined effects of heat and moisture on the structural elements of existing buildings. In order to minimize the negative impact of moisture, the concept of introducing a protective barrier inside the wall structure was proposed. The study showed that after a certain time interval, the non-stationary process of heat and moisture transfer goes into a stationary mode. The results of the study emphasize the importance of an integrated approach to the design of thermal insulation systems, which will ensure the reliability and efficiency of modern buildings in the long term.

Keywords: thermal protection of buildings, heat and humidity regime, modern thermal insulation, heat losses, COMSOL Multiphysics, protective barrier.

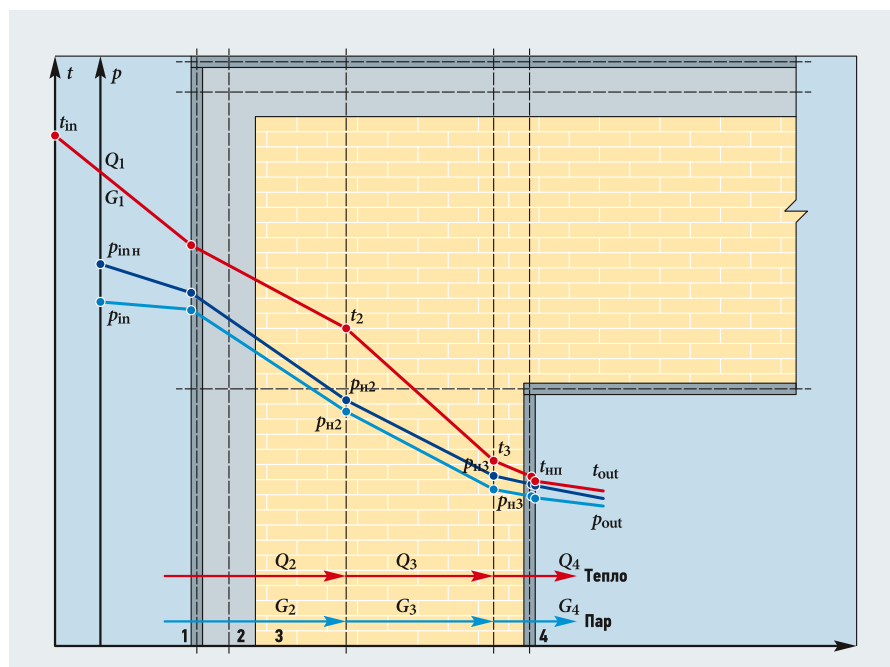


Рис. 1. Фрагмент схемы ограждающей конструкции [1 — штукатурный слой известковой штукатурки; 2 — кирпичная стена; 3 — теплоизоляционный материал «Пеноплекс»; 4 — облицовочный слой (внешняя штукатурка)]

стену от холодной внешней среды, и внешнего защитного покрытия в виде керамогранитных плит, сайдинга или декоративной штукатурки. Этот конструктивный элемент может быть охарактеризован как отдельный строительный блок, отражающий свойства теплового моста. Формирование тепловой защиты типового здания происходит на основании определённого комплекта однородных элементов на фасаде в процессе его модернизации или ремонта. Исследование особенностей данной конструкции становится важным для создания эффективных систем теплоизоляции и защиты от воздействия внешней среды, что, в свою очередь, приводит к улучшению энергетической эффективности зданий и повышению их долговечности. Таким образом, комплексный подход к исследованию данных параметров способен значительно улучшить качество и устойчивость современных строительных решений.

При решении задач теплопроводности необходимо учитывать требования к программам, которые используются для расчёта температурных полей и тепловых потоков через конструкции. Моделирование тепловых мостов в строительстве включает серию тестовых исследований для проверки численных методов. Программное обеспечение COMSOL Multiphysics успешно проходит тестовые испытания, описанные в стандарте, с созданием точных моделей узлов, генерацией расчётной сетки и достижением заданной точности результатов [1, 4].

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 [9].

Реализация предложенной модели для вычисления тепло- и влагопереноса в ограждающих конструкциях осуществлена

с применением инструментов и функций программного комплекса COMSOL Multiphysics 6.2. Исходные данные, использованные для анализа, были собраны на основе климатических условий города Луганска. В расчётах учитывалась температура воздуха внутри помещения, а также относительная влажность внутреннего воздуха. При этом особое внимание было уделено параметрам наружной среды, включая температуру и относительную влажность наружного воздуха, что особенно важно для динамического анализа при изменении этих значений. Применение специализированных функций позволит более точно моделировать процессы теплопередачи и влагопереноса, что, в свою очередь, способствует оптимизации проектирования ограждающих конструкций и повышению их энергоэффективности.

Для расчёта взяты значения физико-технических параметров материальных слоёв наружной ограждающей конструкции, получены экспериментальным путём.

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

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 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 энергозащитённости в зависимости 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. 1. Данная модель состоит из четырёх слоёв, характеристики которых заданы в табл. 1. Граничными условиями являлась температура внутри и снаружи конструкции.

Теплотехнические характеристики четырёхслойной модели стены

табл. 1

Параметры	Внутренняя штукатурка	Кирпичная кладка	«Пеноплекс Комфорт»	Внешняя штукатурка
Толщина слоя, м	0,02	0,51	0,10	0,02
Плотность, кг/м ³	1800	1800	30	1800
Удельная теплоёмкость, кДж/(кг·°C)	0,84	0,88	1,0	0,84
Коэффициент теплопередачи λ в сухом/влажном состоянии, Вт/(м ² ·°C)	0,76 / 0,93	0,7 / 0,81	0,034 / 0,0348	0,76 / 0,93
Коэффициент паропроницаемости μ , мг/(м·ч·Па)	0,09	0,1	0,013	0,09
Коэффициент теплообмена поверхности ограждения с внутренним/наружным воздухом, Вт/(м ² ·°C)	8,7/23,0	8,7/23,0	8,7/23,0	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	0,0121 / -0,0178 / 0,0158 / 0,0099 / 0,0062

Рассмотрим результаты исследуемой конструкции в январе при $t_{in} = 21^\circ\text{C}$, $\varphi_{in} = 50\%$, $t_{out} = -10^\circ\text{C}$, $\varphi_{out} = 86\%$. С помощью COMSOL Multiphysics 6.2 на рис. 2–4 получены функциональные характеристики энергозащищённости ограждающей конструкции угла здания.

Так, на рис. 2а показано распределение температуры на поверхностях слоёв фрагмента конструкции. Задача решалась как в стационарной, так и в нестационарной постановках. На рис. 2б показаны графики изменения температуры в слоях фрагмента ограждающей конструкции при стационарном и нестационарном режимах (расчёт произведён при 31 дне).

Как видно из графиков, в теплоизоляционном слое происходит «перегиб» графика. График при стационарном и нестационарном режимах имеет идентичную форму. Как видно из графиков, нестационарный режим на большем интервале времени переходит в стационарный.

На рис. 2в представлены результаты расчёта влажности данной модели при совместном действии температуры и влажности. График изменения влажности в слоях ограждающей конструкции показан на рис. 2г. Как видно из рис. 2г, в слое утеплителя наблюдается «скачок» значения влажности до 98%, а затем уменьшается до 68% и равномерно понижается по толщине стены до 50%.

Влажность воздуха определяется парциальным давлением пара в его составе, а начальная температура — давлением насыщенности пара. На рис. 3 показаны графики изменения парциального давления и давления насыщенного водяного пара в сечении ограждающей конструкции. Как видно из рис. 3, парциальное давление и давление насыщенного пара в толще утеплителя постепенно увеличиваются и при значении 500 Па сближаются. В этом месте на графике изменения влажности (рис. 2г) наблюдается максимальное значение — 98%. В начале слоя кирпичной стены парциальное давление равно 985 Па, а давление насыщенного пара — 1440 Па. Далее в толще кирпичной стены и слоя внутренней штукатурки наблюдается плавное увеличение значений обоих давлений до их максимальных значений.

В сечении кирпичной стены температура от внутренней стены к внешней постепенно снижается с 21 до $12,3^\circ\text{C}$ (рис. 2б), и с такой же скоростью уменьшается и давление насыщенных паров в кирпичной стене, при этом относительная влажность растёт равномерно. В утеплителе резко растёт скорость уменьшения температуры и давления насыщенных паров.

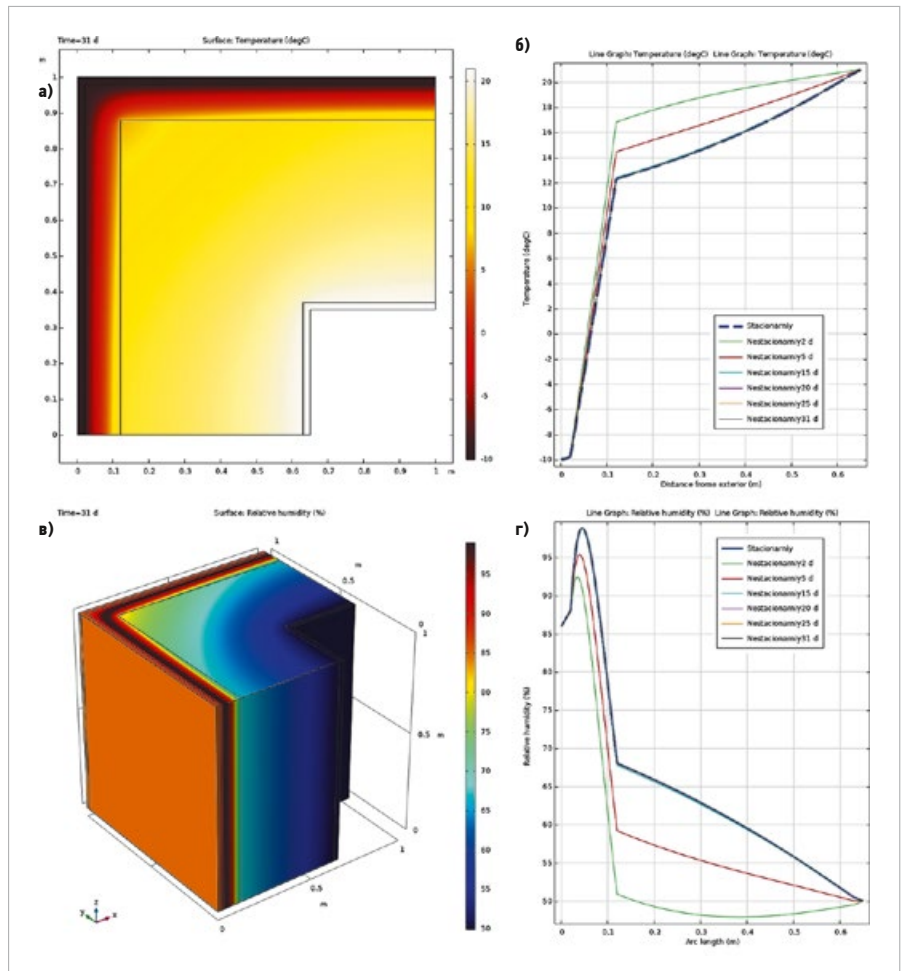


Рис. 2. Характеристики энергозащищённости ограждающей конструкции угла здания (а — изополя изменения температуры в слоях угла стены, б — графики изменения температуры по толщине угла стены, в — изополя изменения влажности в слоях угла стены, г — изменение парциального давления и давления насыщенного пара по толщине стены угла)

Применяя комплексное воздействие тепла и влажности, проведённые исследования продемонстрировали риск конденсации внутри ограждающей конструкции. Хотя сам конденсат, образующийся при отрицательных температурах, не локализуется непосредственно в кирпичной стене, а скапливается в утеплителе, необ-

ходимость в дальнейшем исследовании для снижения концентрации водяного пара и предотвращения накопления влаги остаётся актуальной.

Для оценки возможности устранения конденсации водяного пара в слое теплоизоляции ограждающей конструкции при идентичных условиях температуры

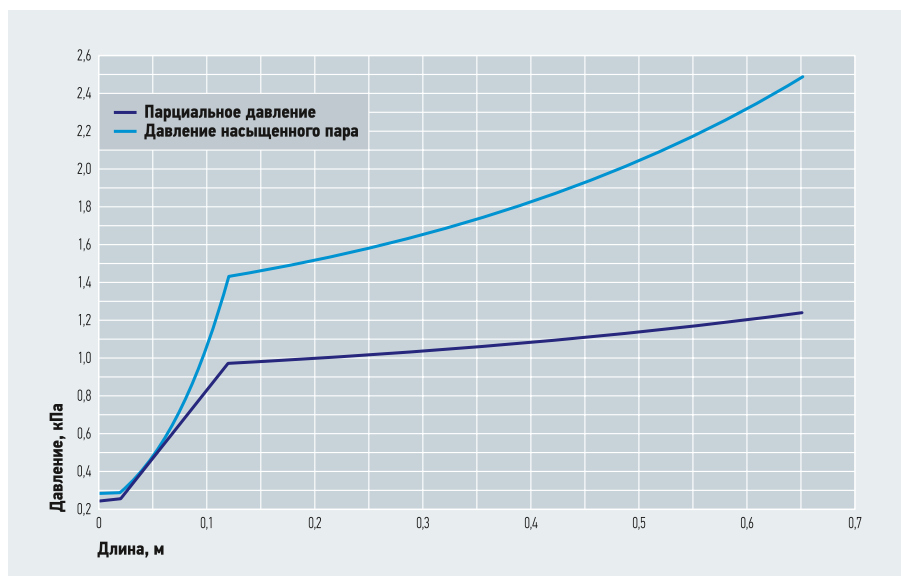


Рис. 3. Парциальное давление и давление насыщенных паров в слоях угла ограждающей конструкции

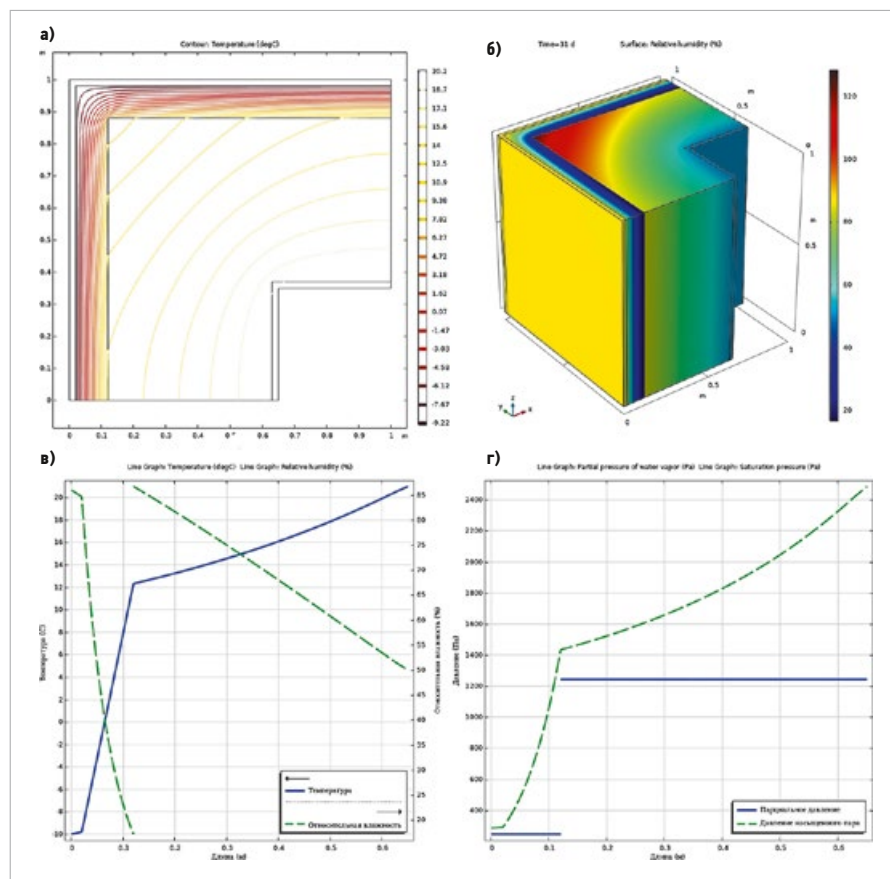


Рис. 4. Характеристики энергозащищённости ограждающей конструкции угла зданий с плёночным барьером (а — изополя изменения температуры в слоях стены угла; б — изополя изменения влажности в слоях угла стены; в, г — изменение температуры и относительной влажности, парциального давления и давления насыщенного пара по толщине угла стены)

и относительной влажности внешней среды, исследуем вторую модель, в которой между кирпичной стеной и утеплителем располагается влагозащитная плёнка. Этот элемент служит дополнительным барьером для диффузии водяного пара снаружи стены. Параметры влагозащитного барьера, включая коэффициент паропроницаемости и толщину, устанавливаются в блоке Thin Moisture Barrier.

Результаты моделирования при включении в геометрию ограждающей конструкции плёночного барьера представлены на рис. 4.

Распределение температуры по толщине ограждения (рис. 4а и 4в) показывает, что значения температур по сравнению с рис. 2а и 2б почти не изменились. А вот при распределении относительной влажности на графиках наблюдаются существенные изменения. Так, относительная влажность возрастает с 50 до 87 % в слое кирпичной стены, а в зоне защитной плёнки наблюдается резкое уменьшение относительной влажности до 17 %. Далее в слое теплоизоляционного материала относительная влажность растёт до 86 %. В угле утеплителя (рис. 4б) наблюдается максимальное значение влажности — 122 %.

На рис. 4г приведены графики распределения парциального давления и давления насыщенного пара в сечении огра-

ждающей конструкции. Парциальное давление в месте утеплителя имеет постоянное значение 246 Па, после защитной плёнки происходит резкий прыжок до 1243 Па, и затем это давление не меняется. Место скачка парциального давления соответствует скачку относительной влажности в этой точке (рис. 4в). Давление насыщенного пара в месте утеплителя (рис. 4г) постепенной увеличивается с 286 до 1433 Па, потом происходит перегиб и давление продолжает увеличиваться до 2487 Па к концу толщины ограждающей конструкции.

Полученные данные позволили определить функциональные характеристики энергозащищённости, как для конструкции со слоем теплоизоляционного материала с защитным барьером, так и без него, в стационарном и нестационарном режимах

Заключение

В современном Луганске осуществляется активное обновление фасадов и реконструкция помещений многоквартирных зданий. Практика работы с такими объектами демонстрирует их потенциальные

возможности для модернизации при относительно невысоких затратах. Для повышения энергоэффективности зданий критически важно учитывать характеристики теплообмена внутри стен в зависимости от изменений температуры и влажности внешней среды. Для этой цели применяют компьютерное моделирование. Предложенная методика, разработанная авторами, включает вычисленные физикомеханические параметры материалов ограждающей конструкции и коэффициенты изотермии сорбции, реализованные в программном пакете COMSOL Multiphysics.

В рамках данного исследования была проведена всесторонняя оценка тепло- и влагозащиты фрагмента стеновой конструкции. Полученные данные позволили определить функциональные характеристики энергозащищённости, как для конструкции со слоем теплоизоляционного материала с защитным барьером, так и без него, в стационарном и нестационарном режимах. Анализ результатов показал, что при увеличении интервала времени нестационарный процесс переходит в стационарный. Использование защитного барьера между кирпичной стеной и утеплителем подтверждает целесообразность повышения тепло- и влагозащиты, что особенно актуально при реконструкции существующих зданий. ●

1. Султангузин И.А., Круликов Д.А., Яцок Т.В., Калыкин И.Д., Яворовский Ю.В., Бартенев А.И., Говорин А.В., Жигулина Е.В., Хромченков В.Г. Применение BIM-, BEM- и CFD-технологий для проектирования, строительства и эксплуатации энергоэффективного дома // Журнал СОК, 2019. №3. С. 36–42.
2. Елохов А.Е. Методики и примеры расчёта тепловых мостов // Строительство и техногенная безопасность, 2015. №1. С. 86–93.
3. 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.
4. Сальников В.Б., Беляков В.А. Теплотехнические расчёты строительных конструкций с применением программного комплекса COMSOL Multiphysics. — Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2016. 48 с.
5. 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.
6. Рязанов М.А., Рудакова Е.В. Влияние ориентации здания на проектные тепловые потери // Журнал СОК, 2018. №11. С. 49–51.
7. Стаценко Е.А., Мусорина Т.А., Островая А.Ф., Ольшеский В.Я., Антуськов А.Л. Влагоперенос в вентилируемом канале с нагревательным элементом // Инженерно-строительный журнал, 2017. №2. С. 11–17.
8. Лелеков А.Т., Сахнов М.Ю., Галочкин С.А., Величко Е.В. Моделирование тепловых объектов с распределёнными параметрами с использованием программных комплексов COMSOL Multiphysics, MATLAB, Simulink // Вестник СибГУ, 2010. №4. С. 40–44.
9. Малыгина О.А. Разработка математических моделей определения тепловлажного режима ограждающих конструкций зданий при нестационарном тепловом потоке // Современные проблемы гражданской защиты, 2024. №3. С. 93–104.

References — see page 79.

Modeling of the heat and humidity state for the corners of buildings in non-stationary mode in the city of Lugansk. Pp. 42–45.

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

1. I.A. Sultanguzin, D.A. Kruglikov, T.V. Yatsyuk, I.D. Kalyakin, Ju.V. Yavorovsky, A.I. Bar-tenev, A.V. Govorin, E.V. Zhigulina, V.G. Hromchenkov. *Primenenie BIM-, BEM- i CFD-tehnologij dlia proektirovaniya, stroitel'stva i jekspluatatsii jenergoeffektivnogo doma* [Application of BIM, BEM and CFD technologies for design, construction and operation of an energy-efficient house]. *Zhurnal Santechnika, otoplenie, konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2019. No. 3. Pp. 36–42. [In Russian]
2. 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]
3. 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 Santechnika, otoplenie, konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2020. No. 6. Pp. 44–50. [In Russian]
4. V.B. Salnikov, V.A. Belyakov. *Teplotekhnicheskie raschety stroitel'nykh konstruksij s primeneniem programmnogo kompleksa COMSOL Multiphysics* [Thermal calculations of building structures using the COMSOL Multiphysics software package]. Ekaterinburg. *Izd-vo UrFU* [Publishing House of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin]. 2016. 48 p. [In Russian]
5. G.I. Parfenov, N.N. Smirnov, A.A. Yablokov, V.K. Pyzhov. *Imitatsionnoe modelirovanie prikladnykh zadach teplo- i vozdukhoozbmena 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 the Ivanovo State Power Engineering University]. 2023. 132 p. [In Russian]
6. M.A. Razakov, E.V. Rudakova. *Vliyanie orientatsii zdaniya na proektnye teplovye poteri* [Influence of building orientation on design heat losses]. *Zhurnal Santechnika, otoplenie, konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2018. No. 11. Pp. 49–51. [In Russian]
7. E.A. Statsenko, T.A. Musorina, A.F. Ostrovaya, V.Ya. Olshevsky, A.L. Antuskov. *Vlagopere-nos v ventiliruemom kanale s nagrevatel'nyim jelementom* [Moisture transfer in a ventilated duct with a heating element]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal* [Engineering and Construction Journal]. 2017. No. 2. Pp. 11–17. [In Russian]
8. A.T. Lelekov, M.Yu. Sakhnov, S.A. Galochkin, E.V. Velichko. *Modelirovanie teplovykh ob#ektov s raspredelennymi parametrami s ispol'zovaniem programmnykh kompleksov COMSOL Multiphysics, MATLAB, Simulink* [Modeling of thermal objects with distributed parameters using COMSOL Multiphysics, Matlab, Simulink software packages]. *Vest-nik SibGU* [Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev]. 2010. No. 4. Pp. 40–44. [In Russian]
9. O.A. Malygina. *Razrabotka matematicheskikh modelej opredeleniya teplovlazhnostnogo rezhima ograzhdajushikh konstruksij zdaniy pri nestatsionarnom teplovom potoke* [Development of mathematical models for determining the heat and humidity conditions of building envelopes with non-stationary heat flow]. *Sovremennye problemy grazhdan-skoj zashity* ["Modern problems of civil protection" Magazine]. 2024. No. 3. Pp. 93–104. [In Russian]