



# Создание модели тепловлажно- стного режима эксплуатации для зданий массовой застройки с утеплителем «Технофас Проф»

Рецензия эксперта на статью получена  
10.01.2025 [The expert review of the article  
was received on January 10, 2025]

Жилые здания и здания гражданского назначения, построенные во времена СССР на территории города Луганска и Луганской области, были возведены по типовым проектам согласно действующим на тот момент нормам проектирования. В последние годы повысились требования по тепловой защите подобных зданий, что привело к необходимости их утепления. Особенно это актуально для зданий массовых застроек [1–7].

Для повышения класса энергосбережения существующих зданий важно учитывать особенности теплообмена в их конструктивных элементах, особенно в условиях изменяющейся внешней среды. Анализ свойств паровоздушной среды, выявление зон возможной конденсации и обледенения, а также грамотный подбор теплоизоляционных материалов помогут предотвратить появление сырости и плесени. Это не только продлит срок эксплуатации зданий, но и обеспечит комфортный микроклимат внутри помещений, что в итоге снизит затраты на обслуживание и эксплуатацию.

В рассмотренной модели анализируется совместное влияние температуры и влажности на работу многослойной ограждающей конструкции, которая состоит из внутреннего слоя штукатурки, непосредственно стены здания (керамзитобетон), утеплителя «Технофас Проф» (фото 1) и из защитного покрытия в виде штукатурки или с вентилируемой прослойкой с защитным слоем из керамогранитных плит. «Технофас Проф» — строительный материал для утепления наружных стен жилых и промышленных зданий, который изготавливается на основе базальтовых волокон с гидрофобными добавками и в основном используется в системах штукатурного фасада.

**Для повышения класса энергосбережения существующих зданий важно учитывать особенности теплообмена в их конструктивных элементах, особенно в условиях изменяющейся внешней среды**

УДК 69.05. Научная специальность: 2.1.3.

## Моделирование тепловлажного состояния для углов зданий в нестационарном режиме в городе Луганске

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

В статье представлены результаты имитационного моделирования тепловлажного состояния ограждающих конструкций в нестационарном режиме работы на примере фрагмента существующей стены реконструированного жилого дома из керамзитобетона в городе Луганске. Рассмотрены два варианта утепления ограждающей конструкции с помощью современного материала «Технофас Проф». В программный комплекс COMSOL Multiphysics автором были интегрированы физико-механические характеристики материалов и коэффициенты переменных параметров, полученные экспериментальным путем. ПО позволило провести комплексный анализ тепло- и влагообменных процессов, что дало возможность глубже понять поведение ограждающих конструкций под воздействием изменяющихся климатических условий. Выявлено, что разработанная имитационная модель эффективно учитывает совместное воздействие тепла и влаги на конструктивные элементы действующих зданий из керамзитобетона. Результаты исследования показывают важность комплексного подхода к проектированию теплоизоляционных систем, что позволит обеспечить надёжность и эффективность функционирования современных и реконструированных зданий в долгосрочной эксплуатации.

**Ключевые слова:** теплозащита зданий, тепловлажностный режим, «Технофас Проф», утеплители, тепловые потери, COMSOL Multiphysics, вентилируемый фасад, штукатурный слой.

UDC 69.05. Scientific specialty number: 2.1.3.

## Modeling of the heat and humidity state for the corners of buildings in an unsteady mode in the Lugansk city

**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 an unsteady mode of operation using the example of a fragment of an existing wall of a reconstructed apartment building made of expanded clay concrete in the city of Lugansk. Two options for insulating the enclosing structure using modern "Technofas Prof" material are considered. The author integrated the physical and mechanical characteristics of materials and coefficients of variable parameters into the COMSOL Multiphysics software package. These parameters were obtained by the author experimentally. The software allowed for a comprehensive analysis of heat and moisture exchange processes, which made it possible to better understand the behavior of enclosing structures under the influence of changing climatic conditions. 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 made of expanded clay concrete. The results of the study show the importance of an integrated approach to the design of thermal insulation systems, which will ensure the reliability and efficiency of modern and reconstructed buildings in long-term operation.

**Key words:** thermal protection of buildings, heat and humidity modes, "Technofas Prof", insulation materials, heat losses, COMSOL Multiphysics, ventilated facade, plaster layer.



❖ Фото 1. Утеплитель для наружных стен

Изучение характеристик данной конструкции приобретает ключевое значение для разработки эффективных систем тепловой изоляции и защиты от внешних воздействий, что способствует повышению энергоэффективности зданий и увеличению их срока службы. Комплексный анализ этих параметров позволяет существенно улучшить качество современных строительных решений, обеспечивая их долговечность и соответствие современным стандартам.

Предложенная методика определения тепло- и влажностояния ограждающих конструкций реализована через программное обеспечение MATLAB Simulink, инте-

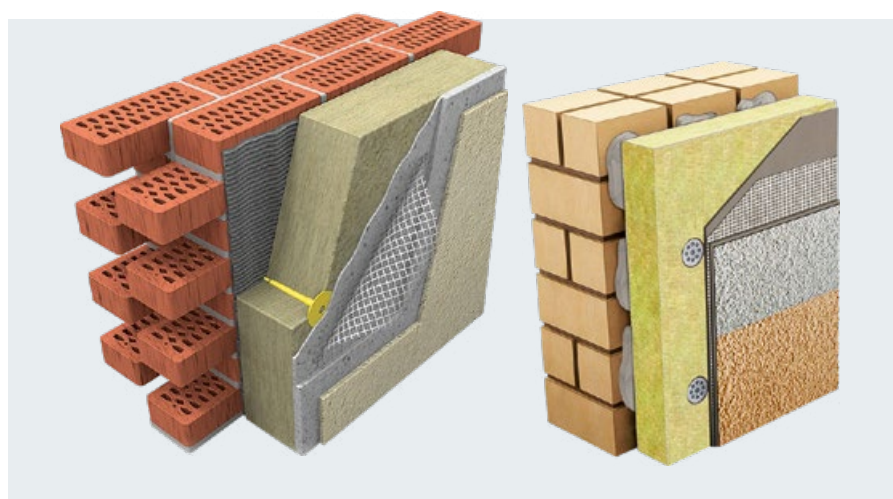
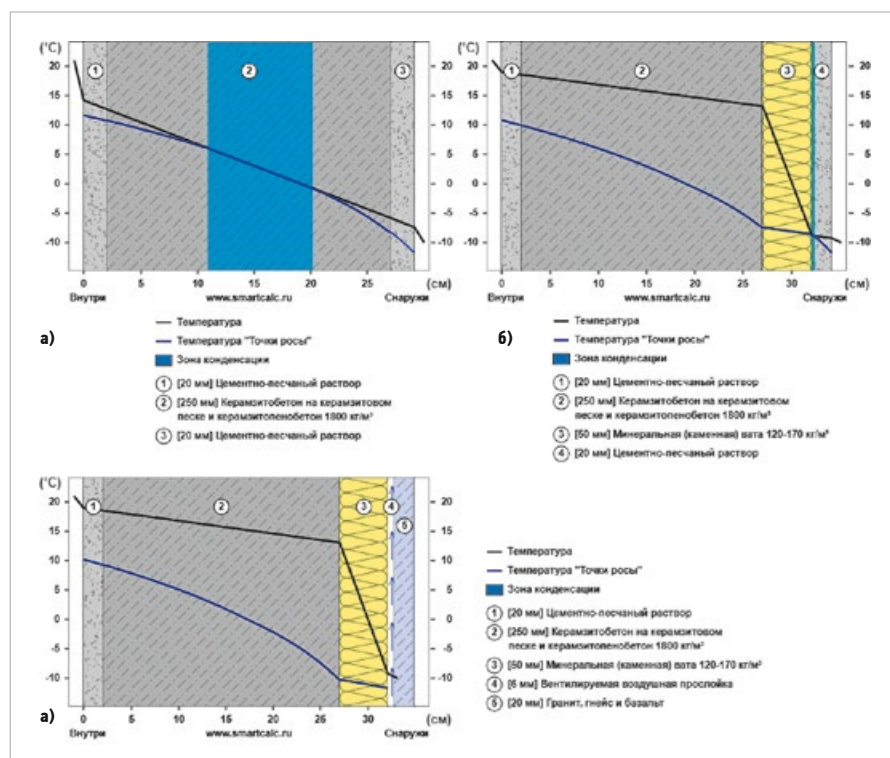


Фото: ГК «Технониколь», Илгу



❖ Рис. 1. Графики изменения температуры по толщине стены до утепления стены и после (а — стена до утепления, б — стена с утеплителем «Технофас Проф» и со штукатурным слоем, в — стена с утеплителем «Технофас Проф» и с вентилируемым фасадом)

грированное в COMSOL Multiphysics. Данное ПО успешно реализует модель «тепловых мостиков» с созданием точных моделей узлов, генерацией расчётной сетки и достижением результатов заданной точности [4, 5]. Предложенная методика определения тепло- и влажностояния состояния ограждающих конструкций основывается на законе теплопроводности Фурье и на законах диффузии пара и влагопроводности в капиллярно-пористых средах [7].

Реализация предложенной модели для вычисления тепло- и влагопереноса в ограждающих конструкциях осуществлена с применением инструментов и функций программного комплекса COMSOL Multiphysics 6.2. В расчётах учитывалась темпе-

ратура воздуха внутри помещения и относительная влажность внутреннего воздуха, а также параметры наружной среды, включая температуру и относительную влажность наружного воздуха. Для расчёта приняты значения физико-технических параметров материальных слоёв наружной ограждающей конструкции, полученные по результатам эксперимента.

С помощью COMSOL Multiphysics 6.2 была создана имитационная модель ограждающей конструкции, с помощью интерфейсов Heat Transfer in Building Materials и Moisture Transport in Building Materials смоделирован совместный перенос тепла и влаги через ограждающую модель. Рассматривались две модели: первая — с утеплителем и с внешним штукатурным слоем, а вторая — с утеплителем и с вентилируемым фасадом.

Результатом проведённого компьютерного моделирования являются характеристики энергозащищённости 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. 2. Данная модель состоит из четырёх слоёв, характеристики которых заданы в табл. 1. Граничными условиями являлась температуры внутри и снаружи конструкции. Задача решалась как в стационарной, так и в нестационарной постановке.

Рассмотрим результаты исследуемой конструкции, полученные в январе месяце при  $t_{in} = 21^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_{in} = 54\%$ ;  $t_{out} = -10^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_{out} = 86\%$ .

Теплотехнический расчёт (рис. 1а) конструкции стены существующего здания выполнен при помощи бесплатной программы smartcalc.ru. Как видно из графиков, во втором слое появилась зона конденсации. Для устранения этой зоны утеплим здание с помощью теплоизоляционного материала «Технофас Проф». На рис. 1б, в показаны результаты теплотехнического расчёта для варианта утеплённой стены со штукатурным слоем и с вентилируемым фасадом. Для этих вариантов стен отсутствует зоны конденсации.

С помощью COMSOL Multiphysics 6.2 на рис. 2–3 получены функциональные характеристики энергозащищённости ограждающей конструкции здания с утеплителем «Технофас Проф».

На рис. 2 рассмотрен вариант утепления ограждающей конструкции со штукатурным слоем. Так, на рис. 2а и 2б показано распределение температуры и влажности на поверхностях слоёв ограждающей конструкции. На рис. 2в показаны графики изменения температуры в слоях фрагмента ограждающей конструкции при стационарном и нестационарном режимах (расчёт произведён при 31 дне). Как видно из рис. 2, в слое утеплителя происходит «перегиб» графика.

Как видно из графиков, представленных на рис. 2а и 2б, нестационарный режим на большем интервале времени переходит в стационарный. В сечении керамзито-

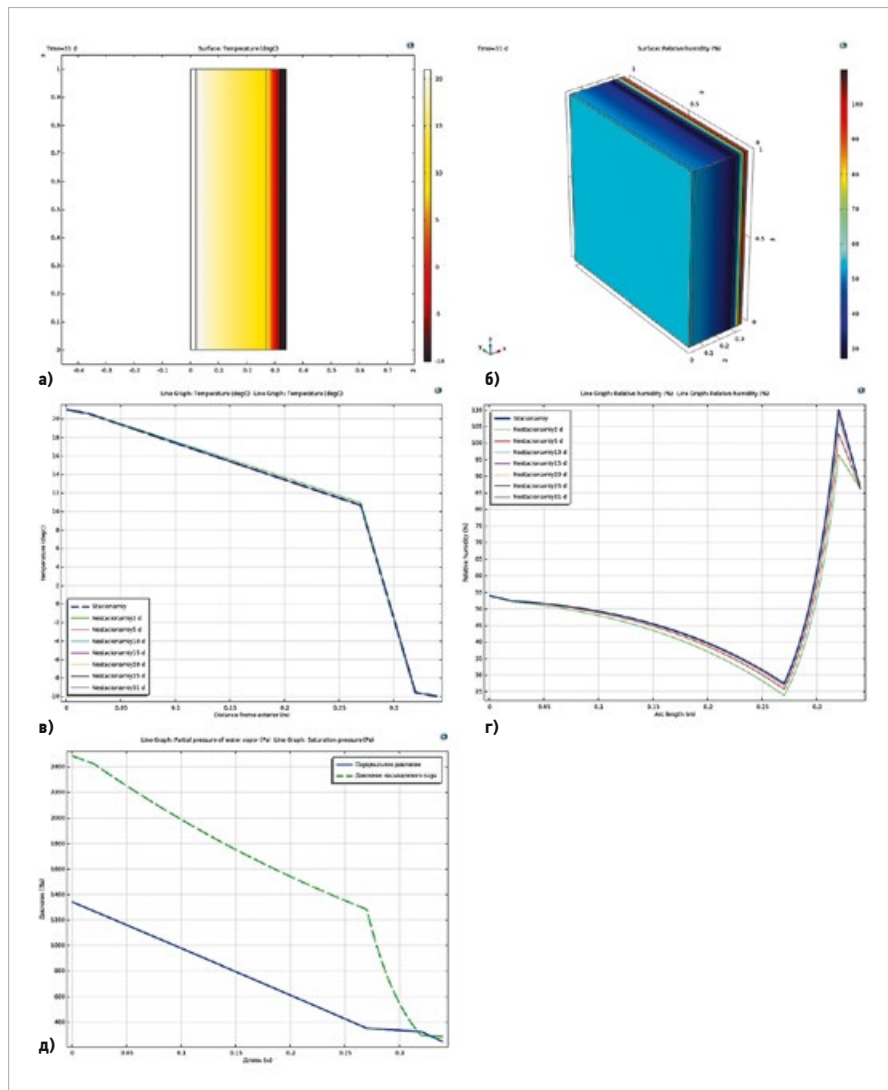


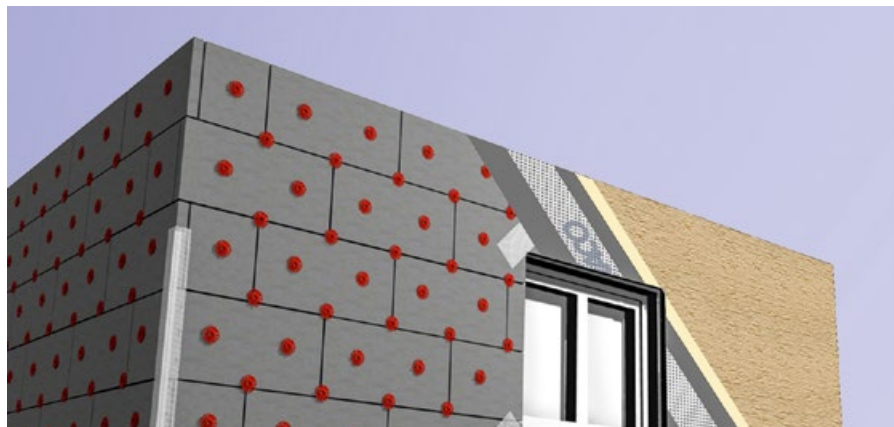
**Рис. 2. Характеристики энергозащищённости ограждающей конструкции со штукатурным фасадом (а — изополя изменения температуры в слоях, б — графики изменения температуры по толщине стены, в — изополя изменения влажности в слоях стены, г — изменение парциального давления и давления насыщенного пара по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

бетонной стены температура от внутренней стены к внешней постепенно снижается с  $21$  до  $11,4^\circ\text{C}$  (рис. 2б), и с такой же скоростью уменьшается и давление насыщенных паров в керамзитобетонной стене. В слое теплоизоляционного материала резко растёт скорость уменьшения температуры и, следовательно, давления насыщенных паров.

На рис. 2г представлены графики изменения влажности в слоях ограждающей конструкции при совместном воздействии температуры и влажности. Как видно из графика, в слое утеплителя наблюдается «скачок» значения влажности до  $110\%$ , которое затем уменьшается до  $27\%$  и равномерно повышается по толщине стены до  $54\%$ .

На рис. 2д показаны графики изменения парциального давления и давления насыщенного водяного пара в сечении ограждающей конструкции.

Как видно из рис. 2г и 2д, парциальное давление и давление насыщенного пара в толщине теплоизоляционного материала постепенно уменьшается и при значении  $320\text{ Па}$  пересекаются. В этом месте на графике изменения влажности (рис. 2г) наблюдается максимальное значение влажности —  $110\%$ . При наступлении слоя керамзитобетонной стены парциальное давление равно  $370\text{ Па}$ , а давление насыщенного пара —  $1350\text{ Па}$ .



На рис. 3 рассмотрен вариант утепления существующей ограждающей конструкции с тем же утеплителем «Технофас Проф» с помощью конструкции вентилируемого фасада. На рис. 3а и 3б приведено распределение температуры и влажности на поверхностях слоёв ограждающей конструкции. Как видно из этих рисунков, в местах металлических дюбелей появляются зоны температурных концентраций и повышенных значений влажности. На рис. 3в показаны графики изменения температуры в слоях фрагмента ограждающей конструкции при стационарном и нестационарном режимах.

Как видно из рис. 3а, 3б и 3в, после слоя утеплителя в месте вентиляционной прослойки происходит «разрыв» графика. В сечении керамзитобетонной стены температура от внутренней стены к внешней снижается по криволинейному закону с «разрывом» с 21 до 10,8 °С (рис. 3б), и с такой же скоростью уменьшается и давление насыщенных паров в керамзитобетонной стене.

На рис. 3г представлены графики изменения влажности в слоях ограждающей конструкции при совместном воздействии температуры и влажности.

Как видно из данного графика, в слое керамзитобетона влажность постепенно увеличивается и достигает максимального значения 116 % в слое утеплителя, а затем при наступлении вентиляционной прослойки наблюдается «разрыв» графика. В слое облицовочного материала график имеет постоянный характер при влажности 86 %.

На рис. 3д показаны графики изменения парциального давления и давления насыщенного водяного пара в сечении ограждающей конструкции. Как видно из графиков, давление насыщенного пара в толщине теплоизоляционного материала постепенно уменьшается до значения 1260 Па, после наступая вентиляционная прослойка, где график «разрывается». В слое облицовочного материала давление насыщенных паров имеет постоянное значение 255 Па. Парциальное давление в слоях стены и утеплителя имеет постоянное значение 1450 Па, а в слое облицовочного материала — 220 Па.

## Заключение

В городе Луганске активно ведутся работы по обновлению фасадов и реконструкции помещений в многоквартирных домах. Опыт реализации подобных проектов показывает, что такие здания обладают значительным потенциалом для модернизации при сравнительно небольших финансовых вложениях.

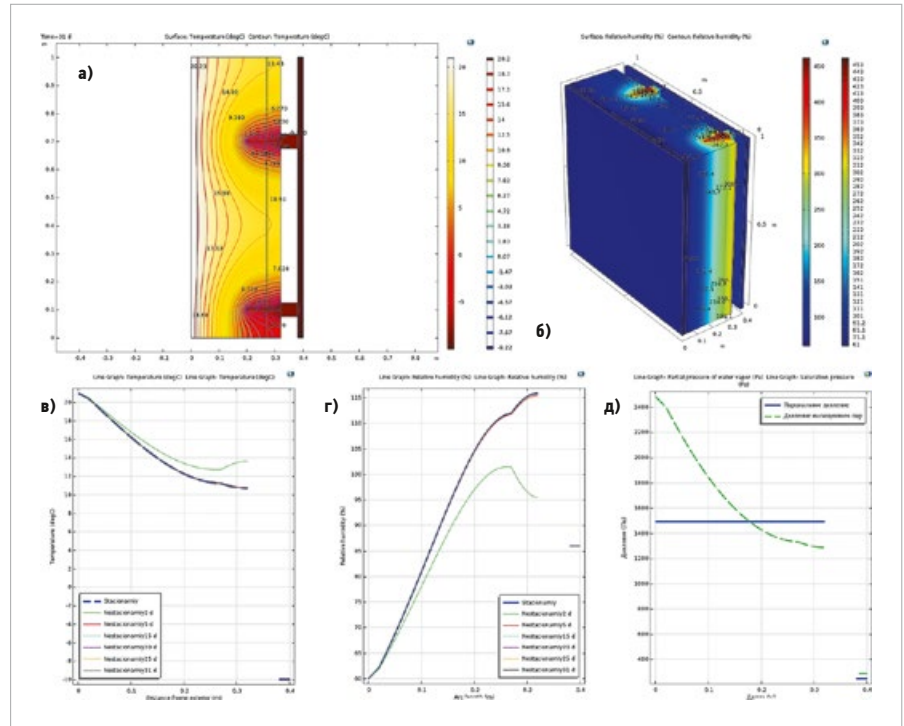


Рис. 3. Характеристики энергозащищённости ограждающей конструкции с вентилируемым фасадом (а — изополя изменения температуры в слоях, б — графики изменения температуры по толщине стены, в — изополя изменения влажности в слоях стены, г — изменение парциального давления и давления насыщенного пара по толщине стены)

Одним из ключевых аспектов повышения энергоэффективности является тщательный учёт особенностей теплообмена внутри стен, который напрямую зависит от колебаний температуры и уровня влажности внешней среды. Грамотное проектирование и внедрение современных технологий позволяют не только улучшить эксплуатационные характеристики зданий, но и существенно снизить энергопотребление, что особенно важно в условиях современных экономических и экологических вызовов. Для этой цели применяют компьютерное моделирование. Предложенная методика включает вычисление физико-механических параметров материалов ограждающей конструкции и её реализация в программном пакете COMSOL Multiphysics.

В рамках данного исследования была проведена всесторонняя оценка тепло- и влагозащиты фрагмента существующей ограждающей конструкции. При воздействии климатических условий в этой конструкции возникает зона конденсации. Поэтому фрагмент стены предложили утеплить с помощью теплоизоляционного материала «Технофас Проф».

Рассмотрены варианты утепления как со слоем теплоизоляционного материала с внешним защитным слоем, так и с устройством вентилируемого фасада. В результате проведённого анализа определены функциональные характеристики энергозащищённости в стационарном и нестационарном режимах для обоих вариантов повышения энергоэффективно-

сти здания. Анализ результатов показал, что в варианте с внешним штукатурным слоем влажность в утеплителе понижается. В варианте устройства вентиляционного фасада в местах установки металлических элементов («мостиков холода») появляются места резкого понижения температуры и влажности.

Проведённое исследование показало, что использование обоих вариантов утепления существующих зданий благоприятно влияет на энергоэффективность зданий, что способствует более комфортным условиям проживания людей.

- Малыгина О.А. Моделирование тепловлажного состояния для углов зданий в нестационарном режиме в Луганске // Журнал СОК. 2024. №10. С. 42–46.
- Елохов А.Е. Методики и примеры расчёта тепловых мостов // Строительство и техногенная безопасность, 2015. №1. С. 86–93.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 80.

**Modeling of the heat and humidity state for the corners of buildings in an unsteady mode in Lugansk city. Pp. 52–56.**

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

1. O.A. Malygina. *Modelirovanie teplovlazhnostnogo sostojanija dlja uglov zdaniy v nestatsionarnom rezhime v gorode Luganske* [Modeling of heat and humidity conditions for corners of buildings in non-stationary mode in Lugansk city]. *Zhurnal Santechnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2024. No. 10. Pp. 42–46. [In Russian]
2. A.E. Elokhev. *Metodiki i primery rascheta 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 jenergoberezenija 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. G.I. Parfenov, N.N. Smirnov, A.A. Yablokov, V.K. Pyzhov. *Imitatsionnoe modelirovanie prikladnykh zadach teplo- i vozdukhoobmena 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 University]. 2023. 132 p. [In Russian]
5. A.T. Lelekov, M.Iu. Sakhnov, S.A. Galochkin, E.V. Velichko. *Modelirovanie teplovykh ob'ektov s raspredelennymi parametrami s ispol'zovaniem programmykh kompleksov COMSOL Multiphysics — MATLAB Simulink* [Modeling of thermal objects with distributed parameters using COMSOL Multiphysics — MATLAB Simulink software packages]. *Vestnik SibGU* [Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev]. 2010. No. 4. Pp. 40–44. [In Russian]
6. E.A. Statsenko, T.A. Musorina, A.F. Ostrovaya, V.Ia. Olshevsky, A.L. Antuskov. *Vlagoperenos v ventiliruемом kanale s nagrevatel'nyim jelementom* [Moisture transfer in a ventilated duct with a heating element]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal* ["Civil engineering journal" Magazine]. 2017. No. 2. Pp. 11–17. [In Russian]
7. O.A. Malygina. *Razrabotka matematicheskikh modelej opredelenija teplovlazhnostnogo rezhima ograzhdajushchikh 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 grazhdanskoj zashchity* ["Modern problems of civil protection" Magazine]. 2024. No. 3. Pp. 93–104. [In Russian]