



Моделирование теплотехнических характеристик утеплённой ограждающей конструкции

Рецензия эксперта на статью получена
15.10.2025 [The expert review of the article
was received on October 15, 2025]

Жилой фонд советского периода, широко представленный зданиями, возведёнными в 1950–1990-е годы, сегодня сталкивается с вызовами времени. Эти строения ещё не достигли критической стадии физического износа, однако их моральное устаревание и несоответствие современным стандартам энергоэффективности становятся всё более очевидными. Построенные в эпоху иных норм тепловой защиты, они демонстрируют значительные потери тепла, что делает актуальным вопрос об их модернизации.

Современные нормативные требования диктуют необходимость повышения теплозащиты ограждающих конструкций зданий, стремясь к снижению энергопотребления и созданию комфортного микроклимата внутри помещений. Достижение нормативных показателей сопротивления теплопередаче требует применения дополнительных теплоизоляционных материалов и систем. В рамках реконструкции зданий массовой застройки широко применяются технологии «мокрого фасада» и навесные фасадные системы. При этом наружное утепление стен признается наиболее эффективным методом, позволяющим минимизировать теп-

ловые потери, оптимизировать тепловой баланс и улучшить микроклимат в существующих зданиях.

В городе Луганске Российской Федерации всё большую популярность приобретают современные отечественные теплоизоляционные материалы [1, 2]. Данные утеплители выделяются высокими эксплуатационными показателями: низкими показателями теплопроводности и малым уровнем горючести. При выборе ма-

Современные нормативные документы требуют повышения теплозащиты ограждающих конструкций зданий, стремясь к снижению энергопотребления и созданию комфортного микроклимата внутри помещений

териалов для утепления зданий приоритет отдаётся качеству и эффективности, и российские производители уверенно занимают лидирующие позиции в этой сфере, обеспечивая надёжность тепловой изоляции и её соответствие современным требованиям.

УДК 69.05. Научная специальность: 2.1.3.

Моделирование теплотехнических характеристик утеплённой ограждающей конструкции

Оксана Александровна Малыгина, старший преподаватель, Луганский государственный университет имени Владимира Даля (ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск); **Владимир Ильич Соколов**, д.т.н., профессор, ЛГУ им. В. Даля

В статье представлены результаты имитационного моделирования тепловлажностного состояния ограждающих конструкций кирпичных и панельных стен с утеплителем «Пеноплекс Комфорт» в нестационарном режиме работы на примере фрагмента существующей стены реконструированного жилого дома в городе Луганске. При помощи программного комплекса COMSOL Multiphysics была построена имитационная модель теплотехнических характеристик ограждающих конструкций. Для подтверждения результатов расчётов по предложенной методике использованы результаты тепловизионного обследования существующих в Луганске зданий. Показано, что утепление здания при помощи штукатурного фасада с утеплителем «Пеноплекс Комфорт» позволяет повысить теплозащитные свойства всей ограждающей конструкции, что способствует созданию более комфортных условий для проживания.

Ключевые слова: теплозащита зданий, тепловлажностный режим, «Пеноплекс Комфорт», современные утеплители, COMSOL Multiphysics, штукатурный слой, тепловизионная съёмка, термограмма.

UDC 69.05. Scientific specialty number: 2.1.3.

Modeling thermal characteristics of insulated fencing construction

Oksana A. Malygina, senior lecturer, Vladimir Dahl Lugansk State University (Vladimir Dahl LSU, Lugansk); **Vladimir I. Sokolov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vladimir Dahl LSU

The article presents the results of simulation modeling of the heat and moisture condition of the enclosing structures of brick and panel walls with Penoplex Comfort insulation in a non-stationary mode of operation using the example of a fragment of an existing wall of a reconstructed residential building in the city of Lugansk. Using the COMSOL Multiphysics software package, a simulation model of the thermal engineering characteristics of the enclosing structures was built. To confirm the calculation results according to the proposed methodology, the results of a thermal imaging survey of existing buildings in Lugansk were used. The results of the study showed that the insulation of the building using a plaster facade with Penoplex Comfort insulation makes it possible to increase the heat-protective properties of the entire enclosing structure, which, in turn, contributes to the creation of more comfortable living conditions.

Key words: building thermal protection, thermal and humidity modes, Penoplex Comfort, modern insulation materials, COMSOL Multiphysics, plaster layer, thermal imaging, thermogram.

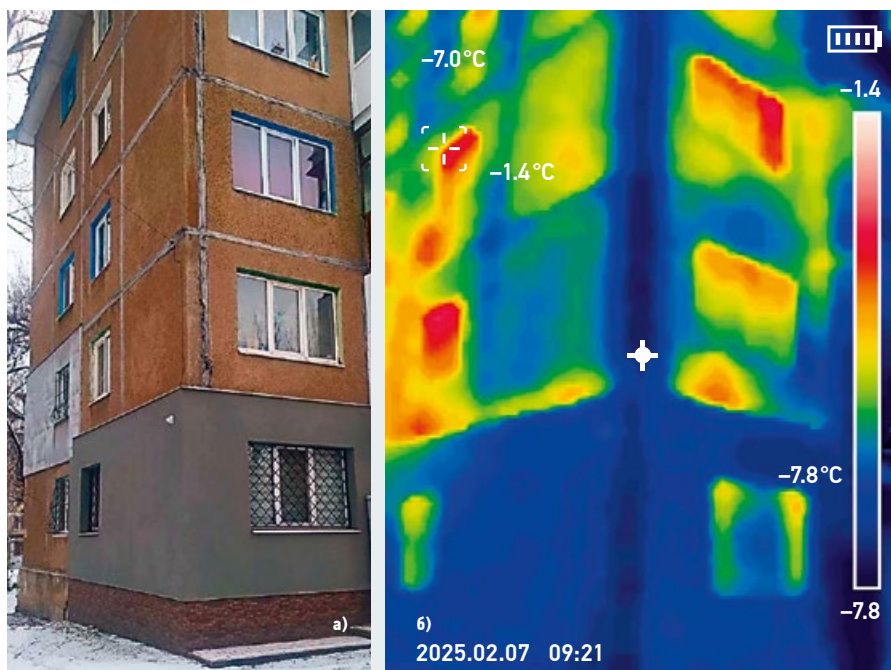


Рис. 1. Кирпичное здание массовой застройки, утеплённое теплоизоляционным материалом «Пеноплекс Комфорт» (а — фото здания, б — термограмма здания)

Для расчёта тепловых потерь системы отопления предложена математическая модель теплооблагоденоса в четырёхслойной ограждающей конструкции с учётом изменения влажности материалов в процессе эксплуатации. Она основывается на законе теплопроводности и законах диффузии пара и влагонепроводности в капиллярно-пористых средах. Данная модель лежит в основе методики моделирования теплотехнических характеристик четырёхслойной ограждающей конструкции с учётом изменения влажности теплоизоляционных материалов в процессе эксплуатации для прогнозирования тепловых потерь системы отопления.

Методика моделирования реализована в программном комплексе COMSOL Multiphysics 6.2 [3], в котором с помощью интерфейсов Heat Transfer in Building Materials и Moisture Transport in Building Materials построена имитационная модель теплотехнических характеристик четырёхслойной ограждающей конструкции для прогнозирования тепловых потерь

систем отопления для климатических параметров Луганска [4–5].

Проведены исследования теплотехнических характеристик и тепловых потерь систем отопления жилых зданий массовой застройки с теплоизоляционным материалом «Пеноплекс Комфорт». Для оценки точности расчётов по предложенной методике использованы результаты тепловизионного обследования теплотехнического состояния наружных ограждающих конструкций для эксплуатируемых в Луганске жилых зданий.

Основной раздел

С помощью COMSOL Multiphysics созданы имитационные модели фрагмента стен жилого кирпичного и панельного зданий, утеплённого с помощью теплоизоляционного материала и покрытого штукатурным слоем. Результатом проведённого компьютерного моделирования являются характеристики энергозащитности в зависимости от условий эксплуатации, полученные при одновременном действии тепла и влаги внутри стены при нестационарном режиме работы ограждающей конструкции.

Модель конструкции стены состоит из слоёв ограждающей конструкции. Граничными условиями являлась температура внутри и снаружи конструкции. На внутренней и внешней стенках для температуры поставлены граничные условия третьего рода, в остальных случаях — первого рода. Конструкция наружной стены кирпичного дома со слоем теплоизоляционного материала показана на рис. 1а.

Внешняя термограмма тепловизионного обследования фасада здания с четырёхслойной ограждающей конструкцией представлена на рис. 1б. Фактическая температура на поверхности фронтальных и торцевых стен, утеплённых теплоизоляционным материалом, колеблется в пределах $-9,5 \dots -9,3^\circ\text{C}$. По результатам компьютерного моделирования температура на внешней поверхности равна $-9,6^\circ\text{C}$.

В табл. 1 приведены исходные данные материалов слоёв ограждающей конструкции рассматриваемого здания.



Исходные данные материалов слоёв ограждающей конструкции

табл. 1

Параметры	Внутренняя штукатурка (цементно-песчаный раствор)	Кирпичная кладка	«Пеноплекс Комфорт»	Внешняя штукатурка (цементно-песчаный раствор)
Толщина слоя, м	0,02	0,51	0,10	0,02
Плотность, кг/м ³	1800	1800	30	1800
Теплоёмкость, кДж/(кг·°C)	0,84	0,88	1,0	0,84
Коэффициент теплопроводности в сухом / влажном состоянии, Вт/(м·°C)	0,76 / 0,93	0,7 / 0,81	0,034 / 0,0348	0,76 / 0,93
Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)	0,09	0,10	0,013	0,09
Коэффициент теплообмена поверхности ограждения с внутренним / наружным воздухом, Вт/(м²·°C)	8,7 / 23,0	8,7 / 23,0	8,7 / 23,0	8,7 / 23,0
Коэффициенты аппроксимации $A_1 / A_2 / A_3 / B_0 / B_1$	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

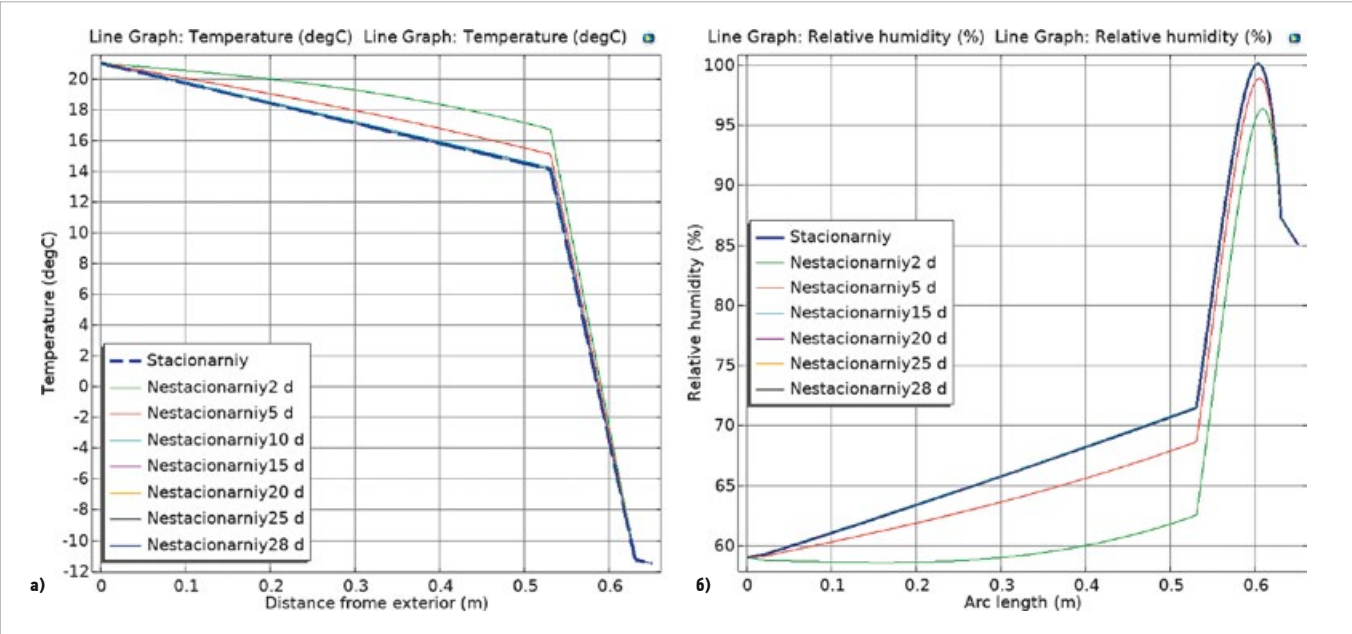


Рис. 2. Распределение температуры и относительной влажности для фрагмента сплошной кирпичной стены (а — графики изменения температуры, б — графики изменения влажности)

На рис. 2 приведены результаты моделирования температурного поля и относительной влажности в ограждающей конструкции с утеплителем «Пеноплекс Комфорт» на протяжении самого холодного месяца эксплуатации. Как показано на рис. 2а, в сечении кирпичной кладки температура постепенно снижается от +21 до +14,7°С, а в слое теплоизоляционного материала быстро уменьшается до –9,8°С. Из рис. 2б видно, что относительная влажность по всей толщине кирпичной стены меняется равномерно от 59 до 74 %, а в толщине утеплителя наблюдается резкий скачок влажности до максимального значения, а затем её уменьшение до 86 %.

Конструкция наружной керамзитобетонной стены, состоящая из слоя штукатурки, керамзитобетонной стеновой панели толщиной 250 мм, теплоизоляционного материала и облицовочного слоя, представлена на рис. 3а. Внешняя термограмма тепловизионного обследования фасада здания с четырёхслойной ограждающей конструкцией приведена на рис. 3б. Фактическая температура наружной по-

верхности стены здания, утеплённой теплоизоляционным материалом, колеблется в пределах –7,71...–7,65°С. По результатам компьютерного моделирования тем-

пература на внешней поверхности имеет значение –7,7°С. В табл. 2 приведены исходные данные материалов слоёв ограждающей конструкции.

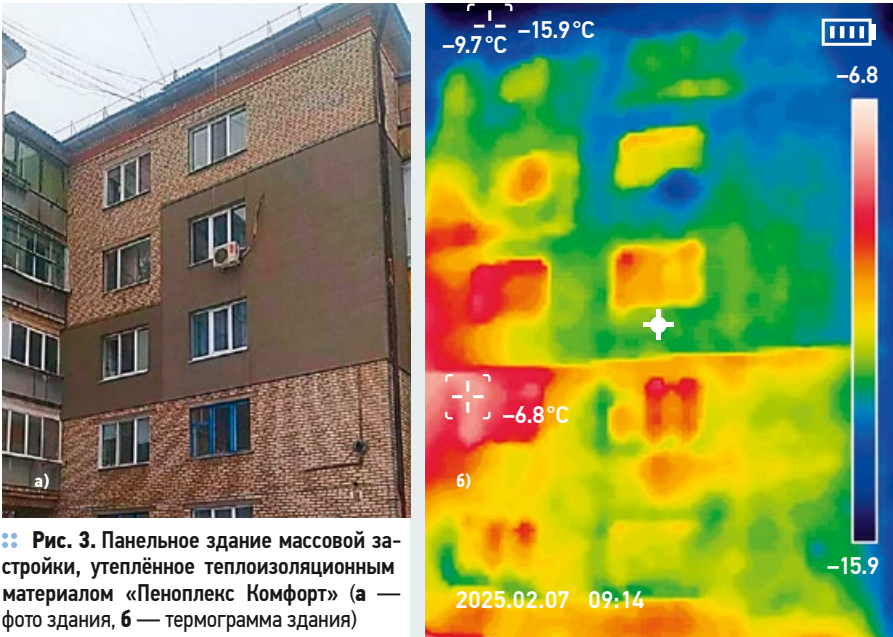


Рис. 3. Панельное здание массовой застройки, утеплённое теплоизоляционным материалом «Пеноплекс Комфорт» (а — фото здания, б — термограмма здания)

Исходные данные материалов слоёв ограждающей конструкции

табл. 2

Параметры	Внутренняя штукатурка (цементно-песчаный раствор)	Бетонная (керамзитобетонная) стена	«Пеноплекс Комфорт»	Внешняя штукатурка (цементно-песчаный раствор)
Толщина слоя, м	0,02	0,25	0,10	0,02
Плотность, кг/м³	1800	1800	30	1800
Теплоёмкость, кДж/(кг·°С)	0,84	0,84	1,0	0,84
Коэффициент теплопроводности в сухом / влажном состоянии, Вт/(м·°С)	0,76 / 0,93	0,80 / 0,92	0,034 / 0,0348	0,76 / 0,93
Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)	0,09	0,09	0,013	0,09
Коэффициент теплообмена поверхности ограждения с внутренним / наружным воздухом, Вт/(м²·°С)	8,7 / 23,0	8,7 / 23,0	8,7 / 23,0	8,7 / 23,0
Коэффициенты аппроксимации A ₁ / A ₂ / A ₃ / B ₀ / B ₁	0,0121 / –0,0178 / 0,0158 / 0,0099 / 0,0062	0,0128 / –0,0187 / 0,0167 / 0,0235 / 0,0207	0,0245 / –0,0320 / 0,0260 / 0,000157 / –0,000198	0,0121 / –0,0178 / 0,0158 / 0,0099 / 0,0062

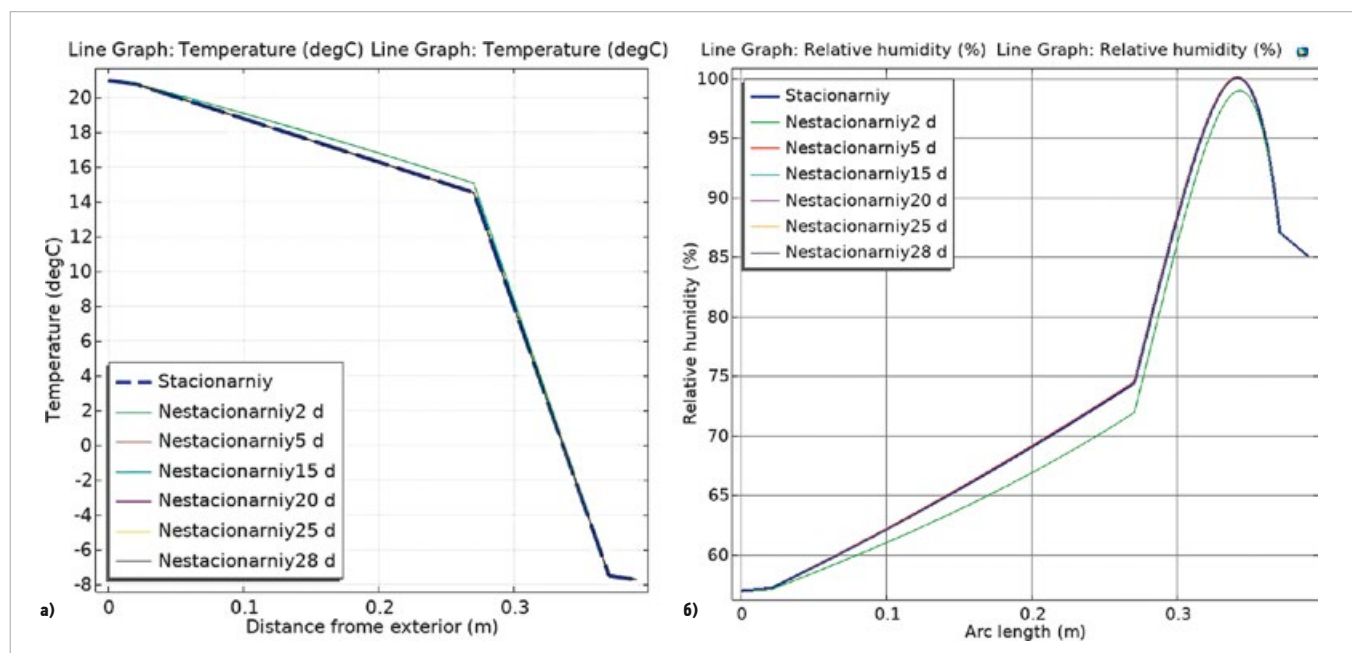


Рис. 4. Распределение температуры и относительной влажности для фрагмента сплошной кирпичной стены (а — графики изменения температуры, б — графики изменения влажности)

На рис. 4 показаны результаты моделирования температурного поля и относительной влажности в ограждающей конструкции с утеплителем «Пеноплекс Комфорт» на протяжении самого холодного месяца эксплуатации.

В рамках исследования был изучен фрагмент ограждающей конструкции с целью оценки её тепло- и влагозащитных свойств. Выявлено, что под воздействием климатических факторов в конструкции образуется зона конденсации

Как видно из рис. 4, значение температуры в сечении материала стены постепенно снижается от 21 до 14,2°C, (рис. 4а), далее в слое утеплителя резко понижается до -7,8°C. Относительная влажность (рис. 4б) по всей толщине панельной стены повышается равномерно от 57 до 78,3%, после чего в толщине утеплителя наблюдается возрастание значения влажности до максимального значения, а затем уменьшение до 86%.

Сравнение температур на поверхности стены, полученных по имитационной модели и с помощью тепловизионной съёмки, представлено в табл. 3.

Проведённое тепловизионное обследование утеплённых ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий с погрешностью до 2,6% согласуется с результатами расчётов по предложенной методике.

Заключение

В условиях растущей стоимости энергоресурсов и обострения экологических проблем повышение энергоэффективности зданий становится приоритетной задачей. Современные технологии, в частности, компьютерное моделирование, позволяют оптимизировать эксплуатационные характеристики зданий и значительно сократить потребление энергии.

В рамках исследования был детально изучен фрагмент существующей ограждающей конструкции с целью оценки её тепло- и влагозащитных свойств. Выявлено, что под воздействием климатических факторов в конструкции образуется зона конденсации.



Для решения этой проблемы были рассмотрены различные варианты существующих зданий массовой застройки, стены которых изготовлены из кирпича и из керамзитобетона. Фасады данных зданий утеплены с использованием теплоизоляционных материалов «Пеноплекс Комфорт» в сочетании с внешним защитным слоем. Проведённый анализ позволил определить характеристики энергозащитности для каждого из предложенных вариантов. Для наглядности результатов расчёта по предложенной методике использованы результаты тепловизионного обследования.

Результаты показали, что проведённое тепловизионное обследование утеплённых ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий согласуется с результатами расчётов по предложенной методике с погрешностью до 2,6%.

Сравнение температур на поверхности стены

табл. 3

Конструкция стены	Материал утеплителя	Температура поверхности стены t [°C]	
		по имитационной модели	по термограмме
Кирпич	«Пеноплекс»	-9,6	-9,5...-9,37
Бетон	«Пеноплекс»	-7,7	-7,71...-7,65

- Колосова А.С., Пикалов Е.С. Современные эффективные теплоизоляционные материалы на неорганической основе // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2020. №9. С. 64–75.
- Колосова А.С., Пикалов Е.С. Современные эффективные теплоизоляционные материалы на органической основе // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2021. №4. С. 74–85.
- 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.
- Малыгина О.А. Моделирование тепловлажностного состояния для углов зданий в нестационарном режиме в городе Луганске // Журнал СОК. 2024. №10. С. 42–46.
- Малыгина О.А. Создание модели тепловлажностного режима эксплуатации для зданий массовой застройки с утеплителем «Технофас Проф» // Журнал СОК, 2025. №4. С. 52–56.

References — see page 128.

Modeling thermal characteristics of insulated fencing construction. Pp. 118–121.

Oksana A. Malygina, senior lecturer, Vladimir Dahl Lugansk State University (Vladimir Dahl LSU, Lugansk city); **Vladimir I. Sokolov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vladimir Dahl LSU

1. A.S. Kolosova, E.S. Pikalov. *Sovremennye jeffektivnye teploizoljatsionnye materialy na neorganicheskoj osnove* [Modern efficient thermal insulation materials on an inorganic basis]. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanij* [International Journal of Applied and Fundamental Research]. 2020. No. 9. Pp. 64–75. [In Russian]
2. A.S. Kolosova, E.S. Pikalov. *Sovremennye jeffektivnye teploizoljatsionnye materialy na organicheskoj osnove* [Modern efficient thermal insulation materials on an organic basis]. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanij* [International Journal of Applied and Fundamental Research]. 2021. No. 4. Pp. 74–85. [In Russian]
3. 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 regime of building enclosing structures under non-stationary heat flow]. *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity* ["Modern Problems of Civil Defense" Magazine]. 2024. No. 3. Pp. 93–104. [In Russian]
4. [O.A. Malygina. Modelirovanie teplovlazhnostnogo sostojanija dlja uglov zdaniy v nestatsionarnom rezhime v gorode Luganske](#) [Modeling the heat and humidity state for building corners in a non-stationary mode in the city of Luhansk]. *Zhurnal Santechnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2024. No. 10. Pp. 42–46. [In Russian]
5. [O.A. Malygina. Modelirovanie teplovlazhnostnogo sostojanija dlja uglov zdaniy v nestatsionarnom rezhime v gorode Luganske](#) [Modeling of the heat and humidity state for the corners of buildings in an unsteady mode in the Lugansk city]. *Zhurnal Santechnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2025. No. 4. Pp. 52–56. [In Russian]