

Прогнозирование тепловых потерь через ограждающие конструкции с учетом изменения влажности материалов

Оксана Александровна Малыгина, Владимир Ильич Соколов

*Луганский государственный университет имени Владимира Даля
(ЛГУ им. В. Даля); г. Луганск, Луганская Народная Республика, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальным направлением повышения эффективности систем отопления жилых зданий массовой застройки является использование теплоизоляционных материалов в наружных ограждающих конструкциях. На стадии проектирования выбор утеплителя производится на основе прогнозирования тепловых потерь через ограждающие конструкции по стандартным методикам, которые не учитывают изменение теплофизических свойств материалов в процессе эксплуатации, в частности изменение их влажности в течение отопительного периода. Цель исследования — разработка методики прогнозирования тепловых потерь систем отопления через наружные ограждающие конструкции с учетом изменения влажности теплоизоляционных материалов в процессе эксплуатации.

Материалы и методы. В основу предлагаемой методики положена математическая модель теплового переноса в четырехслойной ограждающей конструкции, построенная с использованием полученных авторами экспериментальных зависимостей коэффициентов теплопроводности и влагопроводности от сорбционной влажности для типовых теплоизоляционных материалов. Рассматриваемый конструктив состоит из внутреннего известкового штукатурного слоя; кирпичной (или бетонной) стены; теплоизоляционного материала и внешнего облицовочного слоя. Методика прогнозирования тепловых потерь реализована в среде программного комплекса COMSOL Multiphysics 6.2.

Результаты. Выполнены исследования теплофизических характеристик и тепловых потерь четырехслойной ограждающей конструкции с теплоизоляционными материалами IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЭКС КОМФОРТ на примере жилых зданий массовой застройки г. Луганска. Проведенное тепловизионное обследование утепленных ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий согласуется с результатами расчетов по предложенной методике.

Выводы. Разработанная методика прогнозирования обеспечивает повышение точности определения тепловых потерь систем отопления через наружные ограждающие конструкции за счет учета изменения влажности материалов в процессе эксплуатации. Применение методики позволяет оценивать энергоэффективность и экономическую целесообразность использования типовых теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: системы отопления, ограждающие конструкции, тепловые потери, теплофизические свойства, коэффициент теплопроводности, коэффициент влагопроводности, сорбционная влажность, теплотехнические характеристики, моделирование, тепловизионное обследование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Малыгина О.А., Соколов В.И. Прогнозирование тепловых потерь через ограждающие конструкции с учетом изменения влажности материалов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 3. С. 411–421. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.411-421

Автор, ответственный за переписку: Оксана Александровна Малыгина, oksalita@mail.ru.

Predicting thermal loss through building envelopes taking into account changes of material moisture content

Oksana A. Malygina, Vladimir I. Sokolov

Vladymyr Dahl Luhansk State University; Luhansk, Luhansk People's Republic, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The important way to improve the efficiency of residential building heating systems is to use thermal insulation materials in exterior building envelope. At the design stage, the choice of insulation is based on predicting heat loss through the walls using standard methodologies that do not take into account changes in the thermophysical properties of the materials during operation, such as changes of humidity during the heating season. The purpose of this paper is to develop the methodology for predicting heat loss through exterior building envelope, taking into account changes in the moisture content of the thermal insulation materials during operation.

Materials and methods. The proposed methodology is based on the mathematical model of heat and moisture transfer in the four-layer building envelope, which was developed using the authors' experimental data on the dependence of thermal conductivity and moisture conductivity coefficients from sorption moisture content for typical thermal insulation materials.

The structure under consideration consists of an internal lime plaster layer; a brick (or concrete) wall; thermal insulation material and an external facing layer. The methodology for predicting thermal losses was implemented in the COMSOL Multiphysics 6.2 software package.

Results. Studies of the thermotechnical characteristics and heat losses for the four-layer envelope structure with IZOVOL, TEHNOPAS PROF, PENOPLEX COMFORT thermal insulation materials were carried out on the example of residential buildings of mass construction in Lugansk. The conducted thermal imaging survey of insulated envelopes for operated buildings is consistent with the results of calculations according to the proposed methodology.

Conclusions. The developed predicting methodology ensures the accuracy increase of determining the heat loss of heating systems through exterior building envelopes, taking into account changes of the materials moisture content during operation. The application of this methodology allows assessing the energy efficiency and economic feasibility of using standard insulation materials in building envelopes.

KEYWORDS: heating systems, building envelopes, heat losses, thermophysical properties, thermal conductivity coefficient, moisture conductivity coefficient, sorption moisture content, thermotechnical characteristics, modeling, thermal imaging survey

FOR CITATION: Malygina O.A., Sokolov V.I. Predicting thermal loss through building envelopes taking into account changes of material moisture content. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(3):411-421. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.411-421 (rus.).

Corresponding author: Oksana A. Malygina, oksalita@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальным направлением повышения эффективности систем отопления жилых зданий массовой застройки является использование теплоизоляционных материалов в наружных ограждающих конструкциях [1–3]. Включение в конструкцию стены слоя утеплителя обеспечивает требуемые теплозащитные свойства здания в течение заданного периода эксплуатации [4–7]. В настоящее время особую важность данный вопрос приобретает для Луганской Народной Республики, где практически весь жилой фонд был построен в СССР согласно типовым проектам в соответствии с действующими в тот период нормами и стандартами.

На стадии проектирования выбор теплоизоляционного материала производится на базе прогнозирования тепловых потерь через наружные ограждающие конструкции по стандартным методикам, которые не учитывают изменение теплофизических свойств материалов в процессе эксплуатации, в частности изменение их влажности в течение отопительного периода. В то же время существует ряд подходов к исследованию процессов теплового переноса в ограждающих конструкциях, которые комплексно описывают процессы теплопроводности, конвективного теплообмена, теплопроводности и диффузии водяного пара с учетом межслойных и наружных граничных условий [8–11].

Ключевое из известных подходов к оценке тепловых потерь — это моделирование процессов теплопроводности на основе численного решения дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных и уравнения теплового потока при постоянных теплофизических свойствах материалов [12–14]. Наличие удобных интерфейсов в современных программных комплексах [15, 16] дает возможность рассчитывать теплотехнические характеристики многослойных ограждающих конструкций с произвольным выбором материалов слоев. Несмотря на свою простоту, этот подход сегодня

практически не используется ввиду низкой точности результатов моделирования, поскольку не учитывается изменение теплофизических свойств в процессе эксплуатации.

Добиться повышения точности определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций позволяет задание в расчет нормативных условий эксплуатации, сформированных с учетом изменения теплофизических свойств материалов в течение отопительного периода [17–19]. На основе такого подхода появляется возможность объективно анализировать энергоэффективность и экономическую целесообразность применения типовых теплоизоляционных материалов.

Необходимо отметить весомый вклад в развитие методов установления теплотехнических характеристик ограждающих конструкций, представленный в работах В.Г. Гагарина, В.В. Козлова, С.В. Корниенко, П.П. Пастушкова, А.Г. Перехоженцева [20–23], в которых показаны подходы для более точного моделирования влагопереноса в реальных условиях эксплуатации зданий.

В ряде работ авторов [24–27] рассмотрены вопросы моделирования отдельных аспектов процессов теплового переноса, в том числе экспериментально полученные зависимости коэффициентов теплопроводности и влажностеплопроводности от сорбционной влажности для типовых теплоизоляционных материалов IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ.

Выполненный анализ убедительно показывает, что дальнейшее развитие методов прогнозирования тепловых потерь через ограждающие конструкции может быть достигнуто на базе численного моделирования комплексных процессов теплопроводности, конвективного теплообмена, влажностеплопроводности и диффузии водяного пара с учетом эмпирических зависимостей для теплофизических свойств материалов, полученных на основе экспериментальных исследований в реальных условиях эксплуатации.

Цель исследования — разработка методики прогнозирования тепловых потерь систем отопления через наружные ограждающие конструкции с учетом изменения влажности теплоизоляционных материалов в процессе эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основу предлагаемой методики положена математическая модель тепло-влажностного переноса в четырехслойной ограждающей конструкции, построенная с использованием полученных авторами экспериментальных зависимостей коэффициентов теплопроводности и влагопроводности от сорбционной влажности для типовых теплоизоляционных материалов. Рассматриваемая конструкция (рис. 1) состоит из внутреннего известкового штукатурного слоя — 1; кирпичной (или бетонной) стены — 2; теплоизоляционного материала — 3; внешнего облицовочного слоя — 4. Каждый слой ограждающей конструкции имеет свою толщину δ_i , где i — номер слоя. Общая толщина всей конструкции стены $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4$.

Для каждого i -го слоя ограждающей конструкции справедливо уравнение теплового потока и дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$q_i = -\lambda_i(W_i) \frac{\partial T_i}{\partial x}; \quad (1)$$

$$c_i(W_i) \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i(W_i) \frac{\partial T_i}{\partial x} \right), \quad (2)$$

где $q_i = Q_i/A$ — плотность теплового потока Q_i через площадь изотермической поверхности A в i -м слое

ограждающей конструкции; $\lambda_i(W_i)$ — коэффициент теплопроводности в i -м слое как функция W_i ; W_i — влажность в i -м слое; T_i — температура в i -м слое; x — координата; $c_i(W_i)$ — теплоемкость материала i -го слоя как функция W_i ; ρ_i — плотность материала в i -м слое; t — время.

Граничные условия для температуры имеют вид:

$$\alpha_{in} (T_{in} - T_1(0)) = -\lambda_1(0) \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=0}; \quad (3)$$

$$T_1(\delta_1) = T_2(\delta_1); \quad (4)$$

$$T_2(\delta_1 + \delta_2) = T_3(\delta_1 + \delta_2); \quad (5)$$

$$T_3(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) = T_4(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3); \quad (6)$$

$$-\lambda_4(\delta) \left. \frac{\partial T_4}{\partial x} \right|_{x=\delta} = \alpha_{out} (T_4(\delta) - T_{out}), \quad (7)$$

где α_{in} и α_{out} — коэффициенты теплоотдачи на внутренней и внешней поверхности ограждающей конструкции; T_{in} — температура внутри помещения здания; T_{out} — температура наружного воздуха.

Для каждого i -го слоя записано уравнение переноса водяного пара и дифференциальное уравнение его диффузии:

$$G_i = -\mu_i(W_i) \frac{\partial P_i}{\partial x}; \quad (8)$$

$$\xi_i(W_i) \rho_n \frac{\partial P_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_i(W_i) \frac{\partial P_i}{\partial x} \right), \quad (9)$$

где G_i — поток водяного пара в i -м слое ограждающей конструкции; $\mu_i(W_i)$ — коэффициент паропрони-

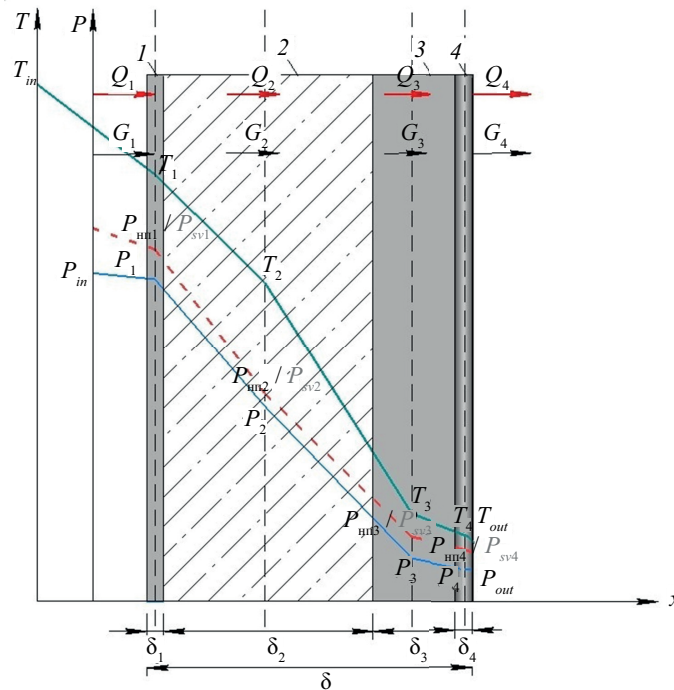


Рис. 1. Расчетная схема ограждающей конструкции

Fig. 1. The design scheme of the building envelope

цаемости i -го слоя как функция W_i ; P_i — парциальное давление в i -м слое; $\zeta_i(W_i)$ — удельная пароемкость материала i -го слоя как функция W_i ; ρ_n — плотность водяного пара.

Граничные условия для парциального давления имеют вид:

$$P_1(0) = P_{in}; \quad (10)$$

$$P_1(\delta_1) = P_2(\delta_1); \quad (11)$$

$$P_2(\delta_1 + \delta_2) = P_3(\delta_1 + \delta_2); \quad (12)$$

$$P_3(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) = P_4(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3); \quad (13)$$

$$P_4(\delta) = P_{out}; \quad (14)$$

где P_{in} — парциальное давление внутри помещения; P_{out} — парциальное давление наружного воздуха.

Для каждого i -го слоя ограждающей конструкции справедливо уравнение потока капельной влаги и дифференциальное уравнение влагопроводности:

$$g_i = -\beta_i(W_i) \frac{\partial W_{fi}}{\partial x}; \quad (15)$$

$$\rho_i \frac{\partial W_{fi}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta_i(W_i) \frac{W_{fi}}{\partial x} \right), \quad (16)$$

где g_i — поток капельной влаги в i -м слое; $\beta_i(W_i)$ — коэффициент влагопроводности в i -м слое как функция W_i ; W_{fi} — капельная влажность в i -м слое.

Граничные условия для влагосодержания имеют вид:

$$W_{f1}(0) = W_{fin}; \quad (17)$$

$$W_{f1}(\delta_1) = W_{f2}(\delta_1); \quad (18)$$

$$W_{f2}(\delta_1 + \delta_2) = W_{f3}(\delta_1 + \delta_2); \quad (19)$$

$$W_{f3}(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) = W_{f4}(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3); \quad (20)$$

$$W_{f4}(\delta) = W_{fout}; \quad (21)$$

где W_{fin} — влагосодержание внутри помещения; W_{fout} — влагосодержание наружного воздуха.

Влажность в i -м слое является суммой сорбционной влажности W_{si} и капельной влажности W_{fi} :

$$W_i = W_{si} + W_{fi}. \quad (22)$$

Значения коэффициентов B_0, B_1

The B_0 and B_1 coefficients values

Сорбционную влажность принято рассматривать как функцию относительной влажности воздуха:

$$W_{si} = f(\phi_i), \quad (23)$$

где $\phi_i = P_i/P_{nmi}$ — относительная влажность в i -м слое; P_{nmi} — давление насыщенных паров в i -м слое:

$$P_{nmi} = 0,0215T_i^3 + 1,70T_i^2 + 48,08T_i + 613. \quad (24)$$

Принято считать, что если $\phi_i < 1$, то вся влага идет на изменение сорбционной влажности материала, т.е.:

$$W_i = W_{si} \text{ при } \phi_i < 1. \quad (25)$$

Начальные условия при моделировании нестационарных тепловлажностных процессов принимаются согласно известным подходам [8, 11, 12].

Как показывает анализ изменения теплофизических параметров в зависимости от влажности, что подтверждается в дальнейшем расчетами, наибольшее влияние на результаты моделирования оказывает изменение коэффициентов теплопроводности и влагопроводности, что позволяет принимать в рассмотрение только нормативные величины остальных параметров.

Влияние на коэффициенты теплопроводности теплоизоляционных материалов сорбционной влажности W_s описано линейной зависимостью [11, 27]:

$$\lambda = \lambda_{сух}(1 + k \cdot W_s), \quad (26)$$

где $\lambda_{сух}$ — коэффициент теплопроводности материала в сухом состоянии; k — коэффициент, зависящий от вида теплоизоляционного материала.

По результатам экспериментальных исследований получены значения k : для утеплителя IZOVOL — $k = 0,043$, для утеплителя ТЕХНОФАС ПРОФ — $k = 0,041$, для утеплителя ПЕНОПЛЭКС КОМФОРТ — $k = 0,032$.

Влияние сорбционной влажности W_s на коэффициент влагопроводности β также представлено линейной зависимостью:

$$\beta = B_0 W_{si} + B_1, \quad (27)$$

где B_0, B_1 — коэффициенты аппроксимации.

Значения B_0 и B_1 для типовых теплоизоляционных материалов приведены в таблице.

Тепловые потери можно характеризовать плотностью теплового потока (1), которая при стаци-

Теплоизоляционный материал Thermal insulation material	Коэффициенты аппроксимации Approximation coefficients	
	$B_0 \cdot 10^4$	$B_1 \cdot 10^2$
IZOVOL	0,057	-0,011
ТЕХНОФАС ПРОФ TECHNOFAS PROF	0,049	-0,019
ПЕНОПЛЭКС КОМФОРТ PENOPLEX COMFORT	1,370	-0,150



Рис. 2. Фото фасада здания

Fig. 2. The photo of the building facade

онарном режиме без учета граничных эффектов по периметру является одинаковой для всех сечений ограждающей конструкции.

Методика прогнозирования тепловых потерь реализована в программном комплексе (ПК) COMSOL Multiphysics 6.2 [15, 16], где с помощью интерфейсов Heat Transfer in Building Materials и Moisture Transport in Building Materials построена имитационная модель теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции.

Исходя из вышеизложенного, представленная методика реализуется с помощью имитационной модели в ПК COMSOL Multiphysics 6.2, где для проведения численной процедуры задаются геометрические размеры слоев ограждающей конструкции, теплофизические свойства материалов слоев, граничные и начальные условия. Численное моделирование осуществляется методом конечных элементов, а результаты расчета представляются в удобном для обработки и анализа виде.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С использованием предложенной методики выполнены исследования теплотехнических характеристик и тепловых потерь четырехслойной ограждающей конструкции с теплоизоляционными материалами IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЭКС КОМФОРТ на примере жилых зданий массовой застройки г. Луганска. Для оценки точности результатов расчета проводилось тепловизионное обследование утепленных ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий профессиональным тепловизором 256 × 192 Mileseev TR256E.

Результаты моделирования распределения температуры и относительной влажности в ограждающей конструкции кирпичного здания со слоем тепло-

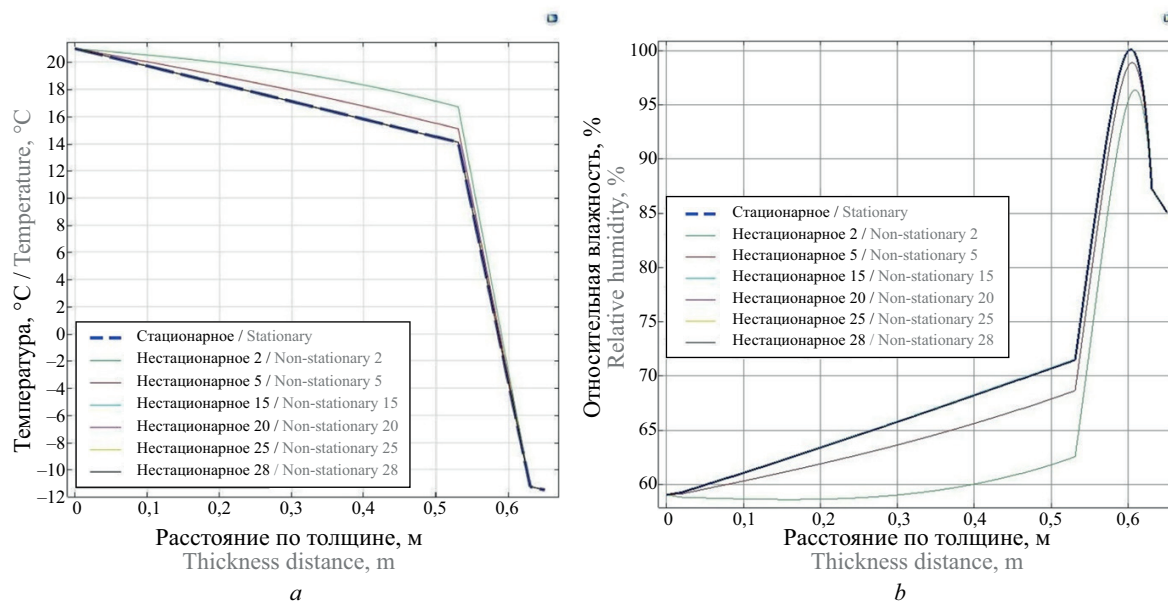


Рис. 3. Распределение температуры и относительной влажности в ограждающей конструкции кирпичного здания со слоем теплоизоляционного материала IZOVOL

Fig. 3. The temperature and relative humidity distribution in the brick building envelope with the IZOVOL thermal insulation material layer

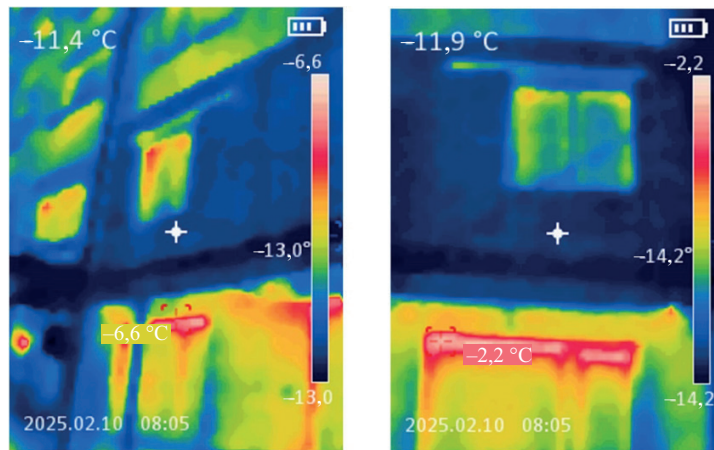


Рис. 4. Внешняя термограмма фасада здания

Fig. 4. The external thermogram of the building facade

изоляционного материала IZOVOL (рис. 2) показаны на рис. 3. Температура воздуха внутри помещения $T_{in} = 21\text{ °C}$, относительная влажность внутреннего воздуха $\varphi_{in} = 52\%$.

Как видно из представленных результатов, полученных для самого холодного месяца отопительного периода, в сечении кирпичной кладки (рис. 3, а) температура постепенно снижается от 21 до 14,1 °C, а в слое теплоизоляционного материала быстро уменьшается до -11,9 °C. Относительная влажность (рис. 3, б) по всей толщине кирпичной стены меняется равномерно от 59 до 74 %, а в толщине утеплителя наблюдается резкий скачок величины влажности до максимального значения, а затем уменьшение до 86 %. Тепловые потери с учетом изменения влажности составляют 8,57 Вт/м², для нормативного условия эксплуатации в сухом состоянии 7,11 Вт/м², а нормативного условия эксплуатации во влажном состоянии имеют значение 7,64 Вт/м².

Внешняя термограмма тепловизионного обследования фасада здания с ограждающей конструкции кирпичного здания со слоем теплоизоляционного материала IZOVOL показана на рис. 4. Фактическая температура на поверхности фронтальных и торцевых стен, утепленных теплоизоляционным материалом, колеблется в пределах -11,4...-11,8 °C. По результатам компьютерного моделирования температура на внешней поверхности имеет значение -11,5 °C.

Результаты моделирования распределения температуры и относительной влажности в ограждающей конструкции панельного здания со слоем теплоизоляционного материала ТЕХНОФАС ПРОФ (рис. 5) показаны на рис. 6. Температура воздуха внутри помещения $T_{in} = 21\text{ °C}$, относительная влажность внутреннего воздуха $\varphi_{in} = 54\%$.

Как видно из представленных результатов, полученных для самого холодного месяца отопительного периода, в сечении панельной стены с утеплителем ТЕХНОФАС ПРОФ (рис. 6, а) температура

постепенно снижается от 21 до 8,6 °C, а в слое теплоизоляционного материала быстро уменьшается до -15,9 °C. Относительная влажность (рис. 6, б) по всей толщине кирпичной стены меняется равномерно от 57 до 78,3 %, а в толщине утеплителя наблюдается резкий скачок величины влажности до максимального значения, а затем уменьшение до 86 %. Тепловые потери с учетом изменения влажности составляют 16,29 Вт/м², для нормативного условия эксплуатации в сухом состоянии 14,68 Вт/м², а нормативного условия эксплуатации во влажном состоянии имеют значение 15,44 Вт/м².



Рис. 5. Фото фасада здания

Fig. 5. The photo of the building facade

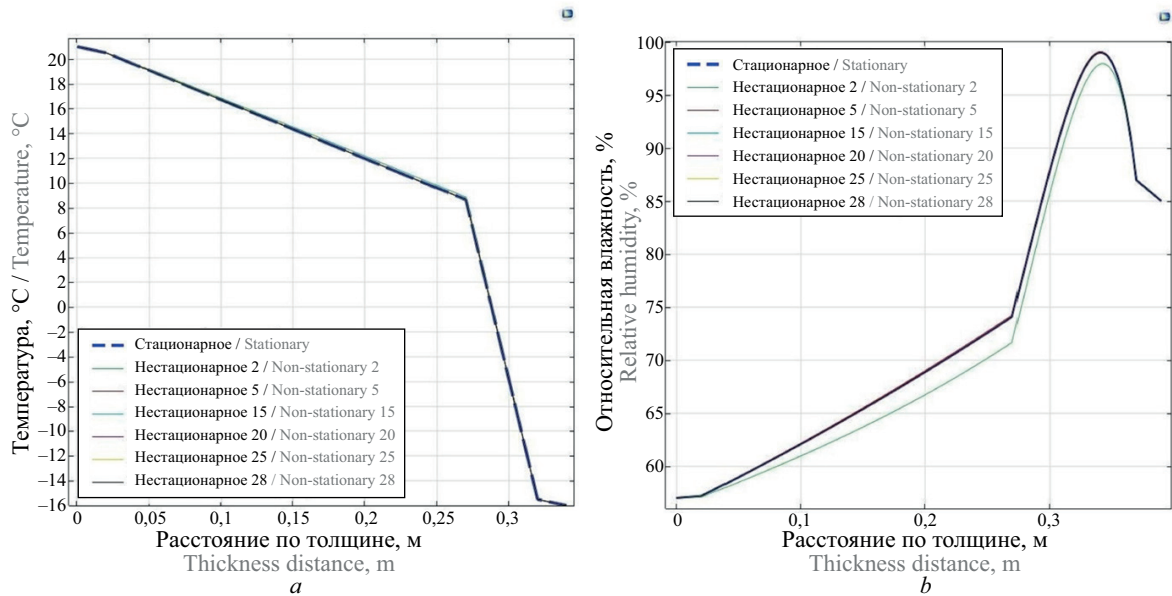


Рис. 6. Распределение температуры и относительной влажности в ограждающей конструкции панельного здания со слоем теплоизоляционного материала ТЕХНОФАС ПРОФ

Fig. 6. The temperature and relative humidity distribution in the panel building envelope with the TECHNOFAS PROF thermal insulation material layer

Внешняя термограмма тепловизионного обследования фасада здания с ограждающей конструкцией панельного здания со слоем теплоизоляционного материала ТЕХНОФАС ПРОФ показана на рис. 7. Фактическая температура на поверхности фронтальных и торцевых стен, утепленных теплоизоляционным материалом, колеблется в пределах $-16,71...-16,73$ °C. По результатам численного моделирования температура на внешней поверхности имеет значение $-16,6$ °C.

Проведенное тепловизионное обследование теплотехнического состояния утепленных ограждающих конструкций с теплоизоляционными материалами IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЭКС КОМФОРТ жилых зданий массовой застройки

г. Луганска с погрешностью до 2,6 % согласуется с результатами численных расчетов по предложенной методике.

Результаты расчета по предложенной методике показали, что реальные тепловые потери через ограждающие конструкции с учетом изменения влажности в условиях эксплуатации г. Луганска существенно отличаются от результатов, полученных для нормативных условий эксплуатации, в зависимости от вида применяемого утеплителя и месяца отопительного периода. Так, например, для кирпичных стен зданий при использовании теплоизоляционного материала IZOVOL расхождение результатов достигает 12,4 %, для панельных зданий с утеплителем ТЕХНОФАС ПРОФ максимальное расхождение составляет 9,8 %.

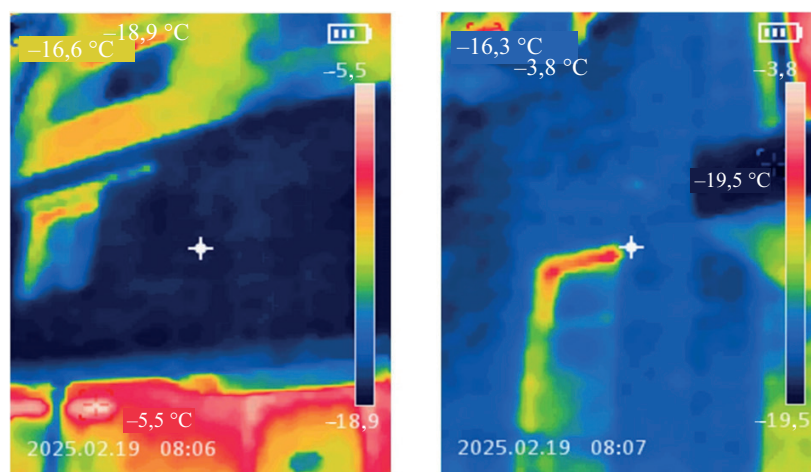


Рис. 7. Внешняя термограмма фасада здания

Fig. 7. The external thermogram of the building facade

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представлена методика прогнозирования тепловых потерь систем отопления через наружные ограждающие конструкции с учетом изменения влажности теплоизоляционных материалов в процессе эксплуатации.

В основу предлагаемой методики положена математическая модель теплообмена в четырехслойной ограждающей конструкции, построенная с использованием полученных авторами экспериментальных зависимостей коэффициентов теплопроводности и влажностеплопроводности от сорбционной влажности для типовых теплоизоляционных материалов. Рассмотрена конструкция, которая состоит из внутреннего известкового штукатурного слоя; кирпичной (или бетонной) стены; теплоизоляционного материала и внешнего облицовочного слоя. Математическая модель комплексно описывает процессы теплопроводности, конвективного теплообмена, влажностеплопроводности и диффузии водяного пара с учетом межслойных и наружных граничных условий. Методика прогнозирования тепловых потерь реализована в среде ПК COMSOL Multiphysics 6.2.

Выполнены комплексные исследования тепло-технических характеристик и тепловых потерь четырехслойной ограждающей конструкции с теплоизоляционными материалами IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЭКС КОМФОРТ на примере жи-

лых зданий массовой застройки г. Луганска. Проведенное тепловизионное обследование утепленных ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий согласуется с результатами расчетов по предложенной методике. Показано, что реальные тепловые потери через ограждающие конструкции с учетом изменения влажности в условиях эксплуатации г. Луганска существенно отличаются от результатов, полученных для нормативных условий эксплуатации, в зависимости от вида применяемого утеплителя и месяца отопительного периода. Так, например, для кирпичных стен зданий при использовании теплоизоляционного материала IZOVOL расхождение результатов достигает 12,4 %, для панельных зданий с утеплителем ТЕХНОФАС ПРОФ максимальное расхождение составляет 9,8 %.

Разработанная методика прогнозирования обеспечивает повышение точности определения тепловых потерь систем отопления через наружные ограждающие конструкции за счет учета изменения влажности материалов в процессе эксплуатации. Применение предложенной методики прогнозирования тепловых потерь систем отопления позволяет выполнить оценку энергоэффективности и экономической целесообразности использования типовых теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях. Дальнейшее развитие рассмотренной методики представляется с учетом возможного переувлажнения материалов слоев ограждающих конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Nigumann E., Kalamees T., Kuusk K., Pihelo P.* Circular renovation of an apartment building with prefabricated additional insulation elements to nearly zero energy building // *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. 2024. Vol. 34. Issue 1. Pp. 22–34. DOI: 10.5755/j01.sace.34.1.35674

2. *Высоцкий Д.В., Татьянников Д.А.* Сравнение вариантов утепления производственного здания при реконструкции // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2020. № 2 (38). С. 57–67. DOI: 10.15593/2409-5125/2020.02.04. EDN ZNLRRP.

3. *Беликов К.Е.* Сравнение теплоизоляционных свойств различных видов утеплителя для строительства частных жилых домов // *Научный журнал молодых ученых*. 2021. № 3 (24). С. 33–38. EDN NXFZDI.

4. *Wang Q.* Thermal insulation performance analysis of high rise building envelope based on finite element analysis // *Thermal Science*. 2022. Vol. 26. Issue 3. Part A. Pp. 2361–2372. DOI: 10.2298/tsci2203361w

5. *Колосова А.С., Пикалов Е.С.* Современные эффективные теплоизоляционные материалы на неорганической основе // *Международный журнал приклад-*

ных и фундаментальных исследований. 2020. № 9. С. 64–75. EDN CTMUIL.

6. *Колосова А.С., Пикалов Е.С.* Современные эффективные теплоизоляционные материалы на органической основе // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2021. № 4. С. 74–85. EDN TUZZKY.

7. *Gamayunova O., Musorina T., Petrichenko M., Goremikins V.* Warming of panel houses in various climatic zones // *Proceedings of ECE 2019. Energy, Environmental and Construction Engineering*. 2020. Pp. 253–263. DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3_22. EDN BGWXUO.

8. *Zubarev K., Gagarin V.* Mathematical modeling of heat and moisture regimes of building for the facade thermal insulation composite system with mineral wool insulation // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022. Pp. 625–634. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2_54

9. *Zubarev K., Gagarin V.* Heat and moisture transfer in building enclosing structures // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Pp. 257–266. DOI: 10.1007/978-3-030-80946-1_26

10. *Sokolov V., Krol O., Chernikova I., Tsankov P., Salukvadze G.* Modeling of Aerodynamic Characteristics

of Ventilation Systems Based on Object Decomposition // Lecture Notes in Civil Engineering. 2025. Pp. 509–519. DOI: 10.1007/978-3-031-80482-3_48

11. *Малыгина О.А.* Разработка математических моделей определения тепло-влажностного режима ограждающих конструкций зданий при нестационарном тепловом потоке // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 3 (52). С. 93–104. EDN NNKWXJ.

12. *Зайцева К.В., Титунин А.А., Гнедина Л.Ю., Ибрагимов А.М.* Тепло- и массоперенос в многослойном деревянном клееном бруссе: постановка задачи // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 8. С. 21–27. EDN UGYVTT.

13. *Кузина В.В., Ерёмкин А.И., Кошев А.Н., Пономарева И.К.* Математическое моделирование температурных и скоростных полей в конвективных потоках от нагретой поверхности отопительного прибора // Региональная архитектура и строительство. 2025. № 1 (62). С. 183–191. DOI: 10.54734/20722958_2025_1_183. EDN JQAPWL.

14. *Павлова М.О., Захаров В.А., Квардакова А.М.* Исследование теплопотерь через узел оконного откоса // Строительная механика и расчет сооружений. 2023. № 3 (308). С. 36–45. DOI: 10.37538/0039-2383.2023.3.36.45. EDN RIIGPA.

15. *Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н.* Моделирование в COMSOL Multiphysics энергосбережения типовых зданий ЖКХ при реконструкции и ремонте // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2020. № 6 (222). С. 44–50. EDN SWRRLH.

16. *Парфенов Г.И., Смирнов Н.Н., Яблоков А.А., Пыжов В.К.* Имитационное моделирование прикладных задач тепло- и воздухообмена в программе COMSOL Multiphysics. Иваново, 2023. 132 с.

17. *Цветков Н.А., Хуторной А.Н., Толстых А.В., Колесникова А.В.* Физико-математическая модель теплового переноса в ограждающих конструкциях из профилированного теплового бруса // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 2 (698). С. 12–20. EDN YTPOMP.

18. *Мусорина Т.А., Заборова Д.Д., Петриченко М.Р.* Математический аппарат для определения термического сопротивления однородной скалярной среды // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 8. С. 1037–1045. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1037-1045. EDN ANCYIM.

19. *Корниенко С.В.* Совершенствование методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций // AlfaBuild. 2020. № 1 (13). С. 1–6. DOI: 10.34910/ALF.13.1. EDN QJXQQH.

20. *Гагарин В.Г., Козлов В.В., Зубарев К.П.* Анализ расположения зоны наибольшего увлажнения в ограждающих конструкциях с различной толщиной теплоизоляционного слоя // Жилищное строительство. 2016. № 6. С. 8–12. EDN WFAXGN.

21. *Корниенко С.В., Чеснокова О.Г., Чеснокова В.Д., Журбенко М.Д.* Динамическое моделирование процесса теплового переноса в многослойных ограждениях // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 4 (85). С. 29–40. EDN СЕННWN.

22. *Гагарин В.Г., Пастушков П.П., Реутова Н.А.* К вопросу о назначении расчетной влажности строительных материалов по изотерме сорбции // Строительство и реконструкция. 2015. № 4 (60). С. 152–155. EDN UAXPEN.

23. *Перехоженцев А.Г.* О потенциале влажности, нормировании и расчете тепловлажностных характеристик наружных ограждений зданий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. № 3–4 (92). С. 39–48. EDN JRSXZX.

24. *Sokolov V.* Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems // Lecture Notes in Networks and Systems. 2019. Pp. 278–283. DOI: 10.1007/978-3-030-04792-4_37

25. *Малыгина О.А.* Анализ теплотехнических свойств наружной ограждающей конструкции по итогам натурных испытаний // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 2 (51). С. 129–139. EDN EDFZBP.

26. *Sokolov V.* Hydrodynamics of Flow in a Flat Slot with Boundary Change of Viscosity // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021. Pp. 1172–1181. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_136

27. *Малыгина О.А., Засько В.В.* Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов во влажном состоянии // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2024. № 5 (169). С. 5–14. DOI: 10.71536/vd.2024.5c169.1. EDN MTXSIN.

Поступила в редакцию 10 октября 2024 г.

Принята в доработанном виде 16 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 7 декабря 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Оксана Александровна Малыгина** — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры проектирования и технологии строительства; **Луганский государственный университет имени Владимира Даля** (ЛГУ им. В. Даля); 291034, г. Луганск, Луганская Народная Республика, квартал Молодежный, 20а; SPIN-код: 2256-9279, РИНЦ ID: 761776, ORCID: 0000-0002-2799-6704; oksalita@mail.ru;

Владимир Ильич Соколов — доктор технических наук, профессор, заместитель директора Института строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства; **Луганский государственный университет имени Владимира Даля (ЛГУ им. В. Даля)**; 291034, г. Луганск, Луганская Народная Республика, квартал Молодежный, 20а; SPIN-код: 8668-7899, РИНЦ ID: 439665, Scopus: 57191822948, ResearcherID: G-9766-2018, ORCID: 0000-0003-0459-1824; sokolov.snu.edu@gmail.com.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

REFERENCES

1. Nigumann E., Kalamees T., Kuusk K., Pihelo P. Circular renovation of an apartment building with prefabricated additional insulation elements to nearly zero energy building. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. 2024; 34(1):22-34. DOI: 10.5755/j01.sace.34.1.35674
2. Vysotsky D., Tatyannikov D. Comparison of insulation options for a production building during reconstruction. PNRPU Bulletin, Applied ecology. *Urban development*. 2020; 2(38):57-67. DOI: 10.15593/2409-5125/2020.02.04. EDN ZNLRPP. (rus.).
3. Belikov K.E. Comparison of the thermal insulation properties of various types of insulation for the construction of private residential buildings. *Scientific Journal of Young Scientists*. 2021; 3(24):33-38. EDN NXFZDI. (rus.).
4. Wang Q. Thermal insulation performance analysis of high rise building envelope based on finite element analysis. *Thermal Science*. 2022; 26(3 Part A): 2361-2372. DOI: 10.2298/tsci2203361w
5. Kolosova A.S., Pikalov E.S. Modern effective thermal insulation materials on inorganic base. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2020; 9:64-75. EDN CTMUIL. (rus.).
6. Kolosova A.S., Pikalov E.S. Modern effective thermal insulation materials on organic base. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2021; 4:74-85. EDN TUZZKY. (rus.).
7. Gamayunova O., Musorina T., Petrichenko M., Goremikins V. Warming of panel houses in various climatic zones. Proceedings of EECE 2019. *Energy, Environmental and Construction Engineering*. 2020; 253-263. DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3_22. EDN BGWXUO.
8. Zubarev K., Gagarin V. Mathematical modeling of heat and moisture regimes of building for the facade thermal insulation composite system with mineral wool insulation. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022; 625-634. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2_54
9. Zubarev K., Gagarin V. Heat and moisture transfer in building enclosing structures. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022; 257-266. DOI: 10.1007/978-3-030-80946-1_26
10. Sokolov V., Krol O., Chernikova I., Tsankov P., Salukvadze G. Modeling of Aerodynamic Characteristics of Ventilation Systems Based on Object Decomposition. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2025; 509-519. DOI: 10.1007/978-3-031-80482-3_48
11. Malygina O.A. Development of mathematical models of definition heat and humidity conditions of building enclosing structures with nonstationary heat flow. *Modern problems of civil protection*. 2024; 3(52):93-104. EDN NNKWXJ. (rus.).
12. Zaitseva K.V., Titunin A.A., Gnedina L.Yu., Ibragimov A.M. Heat and mass transfer in a multi-layer glued wooden beam: formulation of the problem. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 8:21-27. EDN UGYVTT. (rus.).
13. Kuzina V.V., Eremkin A.I., Koshev A.N., Ponomareva I.K. Mathematical modeling of temperature and velocity fields in convective flows from the heated surface of a heater. *Regional Architecture and Engineering*. 2025; 1(62):183-191. DOI: 10.54734/20722958_2025_1_183. EDN JQAPWL. (rus.).
14. Pavlova M.O., Zaharov V.A., Kvardakova A.M. Study of heat loss through a window slope. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2023; 3(308):36-45. DOI: 10.37538/0039-2383.2023.3.36.45. EDN RIIGPA. (rus.).
15. Suchilin V.A., Kochetkov A.S., Gubanov N.N. Modeling in COMSOL Multiphysics of energy saving of typical housing and communal services buildings during reconstruction and repair. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2020; 6(222):44-50. EDN SWRRLH. (rus.).
16. Parfenov G.I., Smirnov N.N., Yablokov A.A., Pyzhov V.K. Simulation of applied heat and air exchange problems in the COMSOL Multiphysics program. Ivanovo, 2023; 132. (rus.).
17. Tsvetkov N.A., Khutornoy A.N., Tolstykh A.V., Kolesnikova A.V. A physico-mathematical model of heat and moisture transfer in building envelopes shaped heat timber. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2017; 2(698):12-20. EDN YTPOMP. (rus.).
18. Musorina T.A., Zaborova D.D., Petrichenko M.R. Mathematical apparatus for determination of homogenous scalar medium thermal resistance. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2019; 14(8):1037-1045. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1037-1045. EDN ANCYIM. (rus.).
19. Korniyenko S.V. Improving methods of temperature and humidity calculation in enclosing structures.

AlfaBuild. 2020; 1(13):1-6. DOI: 10.34910/ALF.13.1. EDN QJXQQH. (rus.).

20. Gagarin V.G., Kozlov V.V., Zubarev K.P. Analysis of the zone location of maximum moistening in the wall system with different thickness of insulation layer. *Housing Construction*. 2016; 6:8-12. EDN WFAXGN. (rus.).

21. Kornienko S.V., Chesnokova O.G., Chesnokova V.D., Zhurbenko M.D. Dynamic modeling of heat and moisture transfer processes in multilayer fences. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2021; 4(85):29-40. EDN CEHHWH. (rus.).

22. Gagarin V., Pastushkov P., Reutova N. Usage of calculated definition of the operating humidity of thermal insulation materials. *Building and Reconstruction*. 2015; 4(60):152-155. EDN UAXPEH. (rus.).

23. Perekhozhentsev A.G. On the potential of humidity, rationing and calculation of heat and humidity characteristics of external fences of buildings. *Bulletin*

of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2023; 3-4(92):39-48. EDN JRSXZX. (rus.).

24. Sokolov V. Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2019; 278-283. DOI: 10.1007/978-3-030-04792-4_37

25. Malygina O.A. Analysis of the thermal properties of the outdoor the enclosing structure according to the results of field tests. *Modern Problems of Civil Protection*. 2024; 2(51):129-139. EDN EDFZBP. (rus.).

26. Sokolov V. Hydrodynamics of Flow in a Flat Slot with Boundary Change of Viscosity. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021; 1172-1181. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_136

27. Malygina O.A., Zasko V.V. Experimental determination of the thermal conductivity coefficient of thermal insulation materials in a wet state. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2024; 5(169):5-14. DOI: 10.71536/vd.2024.5c169.1. EDN MTXSIN. (rus.).

Received October 10, 2024.

Adopted in revised form on October 16, 2024.

Approved for publication on December 7, 2024.

B I O N O T E S : **Oksana A. Malygina** — Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of the Department of Design and Construction Technology; **Vladymyr Dahl Luhansk State University**; 20a, Molodezhny Square, Luhansk, 291034, Luhansk People's Republic, Russian Federation; SPIN-code: 2256-9279, ID RSCI: 761776, ORCID: 0000-0002-2799-6704; oksalita@mail.ru;

Vladimir I. Sokolov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director of the Institute of Construction, Architecture, and Housing and Communal Services; **Vladymyr Dahl Luhansk State University**; 20a, Molodezhny Square, Luhansk, 291034, Luhansk People's Republic, Russian Federation; SPIN-code: 8668-7899, ID RSCI: 439665, Scopus: 57191822948, ResearcherID: G-9766-2018, ORCID: 0000-0003-0459-1824; sokolov.snu.edu@gmail.com.

Contribution of the authors: all authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.