

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.011.1:504.062

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-8-18

Рациональные ограждающие конструкции деревянных зданий: теплопередача и экологический потенциал

С.В. Федосов, В.Н. Федосеев, П.Б. Разговоров, В.А. Воронов

Сергей Викторович Федосов¹

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Москва, Российская Федерация
fedosovsv@mgsu.ru

Вадим Николаевич Федосеев^{2,*}, Владимир Андреевич Воронов²

²Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Российская Федерация
*4932421318@mail.ru**, *amenamiiii@gmail.com*

Павел Борисович Разговоров³

³Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация
razgovorovpb@ystu.ru



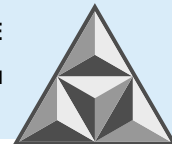
Рассмотрены вопросы разработки и совершенствования рациональных типов ограждающих конструкций деревянных зданий с учетом протекающих в них процессов сопряженного тепломассопереноса и экологической безопасности. Представлен сравнительный анализ типовых конструкций, приведенных к единому нормативному термическому сопротивлению. Выявлено, что деревянные конструкции обладают отрицательным углеродным следом на стадии производства ($-116.2 \text{ кг CO}_2\text{-экв.}\cdot\text{м}^{-2}$) за счет депонирования углерода. Для гарантии долговечности и реализации экологического потенциала обоснована необходимость применения математического моделирования нестационарного тепломассопереноса на основе классической теории академика РААСН С.В. Федосова. Разработанный алгоритм, использующий интегральное преобразование Лапласа и теорию подобия, позволяет получить аналитическое решение в виде быстроходящихся рядов. Это решение служит надежным базисом для разработки численных методов экспериментальных исследований свойств материалов и создания алгоритмов мониторинга технического состояния деревянных конструкций в период эксплуатации.

Ключевые слова: деревянные здания, ограждающие конструкции, тепломассоперенос, экологический потенциал, мониторинг состояния, углеродный след

Для цитирования:

Федосов С.В., Федосеев В.Н., Разговоров П.Б., Воронов В.А. Рациональные ограждающие конструкции деревянных зданий: тепломассоперенос и экологический потенциал // Умные композиты в строительстве. 2026. Т. 7, вып. 3. С. 8-18.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7693/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-8-18



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-8-18

Rational enclosing structures of wooden buildings: heat and mass transfer and environmental potential

S.V. Fedosov, V.N. Fedoseev, P.B. Razgovorov, V.A. Voronov

Sergei Viktorovich Fedosov¹

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

fedosovsv@mgsu.ru

Vadim Nikolaevich Fedoseev^{2,*}, Vladimir Andreevich Voronov²

²Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation

4932421318@mail.ru, amenamiiii@gmail.com*

Pavel Borisovich Razgovorov³

³Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

razgovorovpb@ystu.ru



The paper discusses the development and improvement of rational types of enclosing structures for wooden buildings, taking into account the coupled heat and mass transfer processes occurring in them and environmental safety. A comparative analysis of typical structures reduced to a unified standard thermal resistance is presented. It has been revealed that timber structures have a negative carbon footprint at the production stage ($-116.2 \text{ kg CO}_2\text{-equiv.}\cdot\text{m}^{-2}$) due to carbon sequestration. To ensure durability and realize their environmental potential, the need for mathematical modeling of unsteady heat and mass transfer based on the classical theory of Academician of the RAACS S.V. Fedosov is substantiated. The developed algorithm, employing the integral Laplace transform and similarity theory, makes it possible to obtain an analytical solution in the form of rapidly convergent series. This solution serves as a reliable basis for the development of numerical methods for experimental studies of the properties of materials and for the creation of algorithms for monitoring the technical condition of timber structures during their service life.

Keywords: wooden buildings, enclosing structures, heat and mass transfer, environmental potential, condition monitoring, carbon footprint

For citation:

Fedosov S.V., Fedoseev V.N., Razgovorov P.B., Voronov V.A. Rational enclosing structures of wooden buildings: heat and mass transfer and environmental potential // *Smart Composite in Construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 3. P. 8-18. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7693/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-8-18



ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития строительной отрасли неразрывно связан с концепцией устойчивого развития и необходимостью минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду. На строительный сектор приходится около 39% глобальных выбросов CO₂, при этом значительная часть их формируется на стадии производства материалов – бетона, стали, кирпича и дерева [1]. При возведении конструкций, с учетом стратегии России, направленной на достижение углеродной нейтральности к 2060 году, стоит непростая задача глубокой технологической модернизации в части мониторинга и диагностики их технического состояния, четкого обоснования критериев уровня безопасности при переходе к принципам циркулярной экономики.

Важнейшим инструментом такой трансформации становится наличие прозрачной и достоверной информации о негативном воздействии строительного объекта (продукта) на окружающую среду на всех этапах его жизненного цикла. Известно, что материалы на основе древесины, по сравнению с традиционными кирпичом, газосиликатом или бетоном, являются более экологичными и, следовательно, возведение деревянных ограждающих конструкций может обеспечить для людей более комфортные и безопасные условия проживания [2]. Кроме того, конструктивные элементы из древесины отличаются высокие теплоизоляционные показатели [3]. В общем и целом переход к так называемым «зеленым» строительным технологиям и использованию деревянных ограждающих конструкций обеспечивается сегодня не только предлагаемыми инженерными решениями, но и финансово-экономическими механизмами, стимулирующими производителей к снижению углеродного следа.

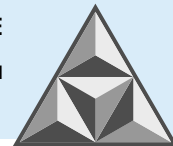
Новую прикладную область в отечественном строительстве 2020-х годов, связанную с поглощением или сокращением объема выбросов парниковых газов, представляет технология климатических проектов, которая опирается на нормативные документы: Постановление Правительства РФ № 1587 от 21.09.2021 «Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации»; Приказ Минэкономразвития России № 248 от 11.05.2022 «Об утверждении критериев и порядка отнесения проектов к климатическим проектам».

Климатические проекты подлежат регистрации в реестре углеродных единиц Минэкономразвития РФ. По состоянию на 2025 год в этом реестре зарегистрировано 64 проекта, включая первый индустриальный объект в категории «Производственные здания» – завод сухих строительных смесей «ЦЕМЕНТУМ» (Московская обл., г. Воскресенск), в поддержку которого была подана экологическая декларация (рейтинг 46%, «серебряный статус»).

Модернизация объектов, осуществляемая при установке ограждающих строительных конструкций, способствующих снижению парниковых газов, позволяет:

- получить субсидирование процентной ставки проектного финансирования стратегического объекта;
- получить субсидирование проектной ставки ипотечного займа;
- претендовать на налоговые льготы для застройщика или собственника;
- претендовать на доступ к так называемому «зеленому» финансированию под патронажем Банка РФ.

Таким образом, наличие верифицированной экологической декларации становится рабочим инструментом, повышающим инвестиционную привлекательность установки рациональных типов ограждающих конструкций и их совершенствования.



МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Углеродный след на стадии производства на 1 м² ограждающей конструкции строения рассчитывали по формуле:

$$CF_{prod} = \sum_{i=1}^n V_i \cdot K_{эм,i} - D_{dep}, \quad (1)$$

где V_i – объем i -материала в строительной конструкции, м³·м⁻²;

$K_{эм,i}$ – коэффициент эмиссии, кг CO₂-экв.·м⁻³;

D_{dep} – депонирование углерода (для древесины).

Углеродный след на эксплуатационной стадии строительных конструкций за столетний период:

$$CF_{oper} = q \cdot 8760 \cdot 100 \cdot K_{эл}, \quad (2)$$

где q – удельный тепловой поток через 1 м² стены, Вт·м⁻²;

8760 – количество часов в году;

$K_{эл} = 0.48 \text{ CO}_2\text{·кВт}^{-1}\text{·ч}^{-1}$ – углеродоемкость электроэнергии РФ.

Для сопоставимости результатов все ограждающие конструкции строения приводятся к единому нормативному требованию по сопротивлению теплопередаче $R_0^{\text{норм}} = 3.2 \text{ м}^2\text{·К·Вт}^{-1}$ (для климатических условий г. Иваново, согласно СП 50.13330.2012). Рассмотрены шесть типовых решений наружных стен (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение конструктивных решений для ограждающих стен строений

Table 1. Comparison of structural solutions for enclosing walls of buildings

№ п/п	Конструкция, размер (мм)	Толщина, мм	$R_0, \text{м}^2\text{·К·Вт}^{-1}$	Масса 1 м ² , кг	Срок службы, лет
1	Деревянная: брус 150 + минеральная вата 150 + вентиляционный зазор	320	4.58	145	100+
2	Кирпичная: кладка 380 + минеральная вата 150	550	4.29	680	100–150
3	Газобетонная: блоки D400, 400	400	4.00	280	50–100
4	Монолитный бетон: 200 мм + утеплитель 150	370	3.87	520	50–100
5	SIP-панель: ориентированно-стружечная плита (ОСП) 12 + пенополистирол (ПСБ-С) 150	174	4.20	42	50–75
6	Легкая стальная тонкостенная конструкция (ЛСТК): профиль + утеплитель 200 + гипсокартонный лист (ГКЛ)	250	4.10	65	50–100

Результаты расчета углеродного следа на стадии производства (A1-A3) приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Углеродный след конструкций на стадии производства (A1–A3), кг CO₂-экв.·м⁻²**Table 2.** Carbon footprint of building structures at the production stage (A1–A3), kg CO₂-eq.·m⁻²

Тип конструкции	Материалы, размер (мм)	CF _{prod}	Депонирование	CF _{net}
Деревянная	Брус: 15, утеплитель: 3.8	+18.8	-135	-116.2
Кирпичная	Кирпич: 91, утеплитель: 3.8	+94.8	0	+94.8
Газобетонная	Газобетон: 48	+48.0	0	+48.0
Бетонная	Бетон: 62, арматура: 36, утеплитель: 3.8	+101.8	0	+101.8
SIP-панель	ОСП: 10, ПСБ: 12	+22.0	0	+22.0
ЛСТК	Сталь: 32, утеплитель: 5, ГКЛ: 3	+40.0	0	+40.0

Необходимо отметить, что ключевой результат: деревянная конструкция имеет отрицательный углеродный след на стадии производства (-116.2 кг CO₂-экв.·м⁻²) за счет депонирования углерода в древесине. Это единственный материал, работающий как «углеродный банк». Результаты расчета полного углеродного следа с учетом эксплуатационной стадии приведены в табл. 3.

Таблица 3. Полный углеродный след за 100 лет эксплуатации конструкций объекта, кг CO₂-экв.·м⁻²**Table 3.** Total carbon footprint over a 100-year operational period of building structures, kg CO₂-eq.·m⁻²

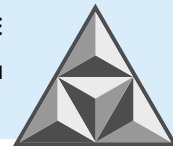
Конструкция	CF _{prod}	CF _{oper}	CF _{demol}	Депонирование	Итого
Деревянная	+18.8	+2150	+5	-135	+2038.8
Кирпичная	+94.8	+2300	+8	0	+2402.8
Газобетонная	+48.0	+2463	+6	0	+2517.0
Бетонная	+101.8	+2550	+10	0	+2661.8
SIP-панель	+22.0	+2350	+15	0	+2387.0
ЛСТК	+40.0	+2400	+12	0	+2452.0

Приведенные данные наглядно демонстрируют, что деревянная конструкция обеспечивает снижение совокупного углеродного следа на 15-25% по сравнению с кирпичными, бетонными и газобетонными аналогами на протяжении столетнего жизненного цикла.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Реализация экологического потенциала конструкции из древесины напрямую зависит от сохранения физико-биологических свойств последней на протяжении всего жизненного цикла (100+ лет). Однако следует учитывать, что вследствие возникновения биопоражений и деградации в режиме эксплуатации экологический эффект может быть нивелирован. В связи с этим разработка новых и совершенствование рациональных типов ограждающих деревянных конструкций с учетом протекающих в них процессов, природно-климатических условий и экологической безопасности становится ключевой задачей [4]. Рассмотренная ранее деревянная каркасная конструкция (брус + минераловатный утеплитель + вентилируемый зазор) представляет собой именно такое рациональное конструктивное решение, минимизирующее риски биопоражений за счет удаления влаги в зазор.

Естественная экологическая и физическая угроза для древесины – превышение критической влажности (более 20%), при которой создаются условия для развития



дереворазрушающих грибов, способных за 5-10 лет уничтожить несущие элементы. Для разработки теоретических основ и методов расчета ограждающих конструкций с учетом природно-климатических и теплофизических условий [5] построим математическую модель реального физико-биологического процесса на основе сопряженного тепло-массопереноса.

Расчетная схема (рис. 1) является физической основой для построения математической модели на базе системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих сопряженный тепло-массоперенос.

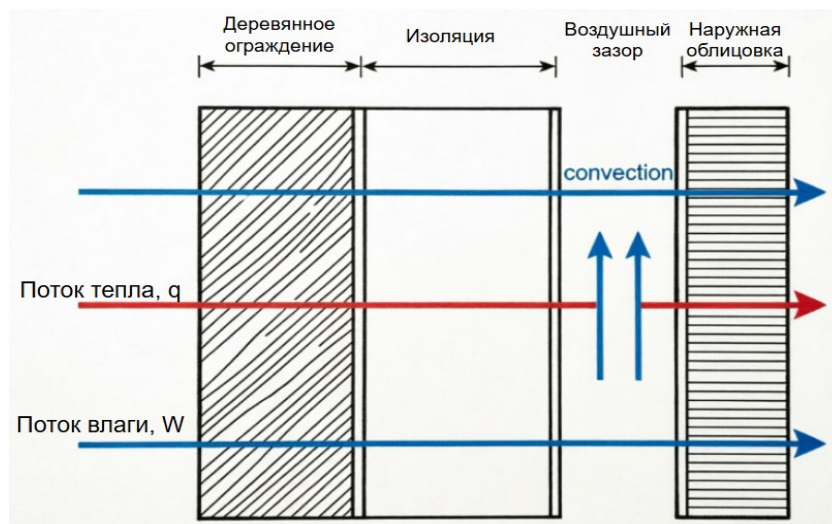


Рис. 1. Расчетная схема сопряженного тепло-массопереноса в деревянной ограждающей конструкции с вентилируемым зазором

Fig. 1. Design scheme of coupled heat and mass transfer in a timber enclosing structure with a ventilated gap

Применение этой схемы позволяет:

- обосновать выбор рациональной конструкции ограждающей стены с точки зрения экологической безопасности и долговечности;
- разработать методы расчета ограждающих конструкций с учётом теплофизических условий и природно-климатических воздействий;
- обеспечить мониторинг технического состояния конструкции через прогноз влажностных полей и предотвращение конденсации.

Математическая модель базируется на системе дифференциальных уравнений в частных производных, описывающей процесс в системе «деревянная конструкция – вентилируемый зазор – наружная облицовка» [6-9]:

Запишем уравнение теплопереноса:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial t_1}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x_1} \right) + r \cdot I_v, \quad (3)$$

где I_v – объемная плотность потока фазового перехода (испарение/конденсация), $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$.

Уравнение влагопереноса с учетом эффекта Соре:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(a_m \frac{\partial W}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(a_m \delta \frac{\partial t_1}{\partial x_1} \right). \quad (4)$$

Применение интегрального преобразования Лапласа и аппарата теории подобия (критерии Фурье, Био, Лыкова, Поздюхина-Лыкова, Коссовича, Нуссельта, Грасгофа, Прандтля, Шервуда, Шмидта, Кирпичева) [10, 11] позволяет получить аналитическое решение в виде быстросходящихся рядов [12]:



$$\theta(X, Fo) = \theta_{уст}(X) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F(s_n, X)}{D'(s_n)} \cdot \exp(s_n \cdot Fo), \quad (5)$$

где s_n – корни характеристического уравнения, определяющие спектр собственных значений задачи.

Полученное аналитическое решение служит надежным базисом для разработки физических и численных методов экспериментальных исследований ограждающих конструкций и конструктивных свойств материалов. Оно позволяет верифицировать натурные эксперименты, точно прогнозировать влажностные и температурные поля в теле конструкции при любых природно-климатических воздействиях и оценивать эффективность различных конструктивных решений.

Кроме того, экологичность здания в фазе эксплуатации определяется объемом потребляемой энергии. Деревянные дома, обладая низкой теплопроводностью, идеально работают в паре с низкопотенциальными теплонасосными системами [13-15], использующими рассеянную энергию окружающего воздуха. Эффект описан еще в 1862 году британским физиком Уильямом Томсоном (лордом Кельвином) в работе «О времени излучения Солнца и концентрации рассеянной энергии» [16].

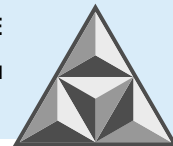
Интеграция разработанного математического аппарата в программный комплекс «цифровой двойник» открывает новые возможности для разработки и развития методов мониторинга, оценки качества и диагностики технического состояния строительных конструкций в период их эксплуатации [17]. Цифровой двойник ограждающей конструкции позволяет в режиме, приближенном к реальному времени, оценивать ее техническое состояние, прогнозировать зоны возможной конденсации влаги и предотвращать биопоражения, сохранять заложенный экологический потенциал (отрицательный углеродный след) на всех этапах эксплуатации.

Подводя итоги исследования, отметим, что экологическая декларация для строительных конструкций, материалов и изделий становится результативным инструментом прозрачной оценки их воздействия на окружающую среду на всех этапах жизненного цикла. В России сформирована нормативная база (ГОСТ Р 71392-2024, ГОСТ Р 71466-2024, ГОСТ Р 72599-2026), которая интегрирует экологические аспекты в финансово-экономические механизмы отрасли.

ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ типовых ограждающих конструкций зданий и сооружений, приведенных к единому нормативному термическому сопротивлению, позволяет осуществить научно обоснованный выбор рационального типа конструкции с учетом протекающих процессов и экологической безопасности. Выявлено, что деревянная конструкция на стадии производства за счет депонирования углерода обладает отрицательным углеродным следом ($-116.2 \text{ кг CO}_2\text{-экв.}\cdot\text{м}^2$) и в течение столетнего жизненного цикла обеспечивает его снижение на 15-20% по сравнению с минеральными аналогами.

Моделирование нестационарного тепломассопереноса на основе классической теории академика РААСН С.В. Федосова обеспечивает решение актуальной задачи расчета ограждающих конструкций с учетом теплофизических условий. Разработанный алгоритм, использующий преобразование Лапласа и теорию подобия, служит базисом и важным инструментом диагностики свойств строительных конструкций деревянных зданий, гарантирует отсутствие их биопоражений. Совершенствование рациональных типов



ограждающих конструкций в сочетании с цифровым мониторингом их состояния формирует новую инженерную реальность, где наличие верифицированных экологических и технических данных открывает доступ к пониманию механизмов «зеленого» финансирования и реализации климатических проектов мирового уровня.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Грановский В.Л.** Энергоэффективность и углеродный след здания. Нормирование целевых показателей // *Энергосбережение*. 2022. № 8. С. 22-28.
2. **Бубнов А.Е., Сапунова А.А., Титуний А.А., Дубровина Ю.Ю.** Эффективность использования цифровых моделей для прогнозирования теплопроводности древесно-минерального композита // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6. Вып. 3. С. 8-18. DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-8-18.
3. **Долматов С.Н.** Анализ потенциальной емкости рынка и объемов потребления стеновых строительных материалов, ориентированных на индивидуальных застройщиков, применительно к технологии древесно-минеральных композитов // *Вестник Поволжского гос. технол. ун-та. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2025. № 1 (33). С. 29-46. <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2025.1.29>.
4. **Ерофеев В.Т., Аль С.Д.С., Федорцов А.П., Федорцов В.А.** Биологическая коррозия бетонов // *Строительные материалы*. 2020. № 11. С. 13-23. DOI 10.31659/0585-430X-2020-786-11-13-23.
5. **Пастушков П.П., Гагарин В.Г.** Воздухопроницаемость минераловатных изделий современного производства // *Строительные материалы*. 2021. № 6. С. 15-20. DOI 10.31659/0585-430X-2021-792-6-15-20.
6. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 599 с.
7. **Лыков А.В., Михайлов Ю.А.** Теория тепло- и массопереноса. М.: ГЭИ, 1963. 536 с.
8. **Федосов С.В.** Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ИПК «ПресСто», 2010. 363 с.
9. **Богомолов А.Н., Федосов С.В.** Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в строительной физике. Иваново: ИВГПУ, 2004. 256 с.
10. **Геххарт Б., Джалурия Й., Махаджан Р., Саммакия Б.** Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. М.: Мир, 1991. 678 с.
11. **Abiev R.S.** Hydrodynamics and Heat Transfer of Circulating Two-Phase Taylor Flow in Microchannel Heat Pipe: Experimental Study and Mathematical Model // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2020. Vol. 59. No. 9. P. 3687-3701. DOI 10.1021/acs.iecr.9b04834.
12. **Федосов С.В., Федосеев В.Н., Воронов В.А.** Численно-аналитический метод сведения задач нестационарной теплопроводности с граничными условиями III рода к задачам с условиями I рода // *Строительные материалы*. 2022. № 12. С. 59-62. DOI 10.31659/0585-430X-2022-809-12-59-62.
13. **Федосов С.В., Федосеев В.Н., Воронов В.А., Емелин В.А.** Практика технических инженерных решений в строительных объектах с интегрированной теплообменно-теплонасосной системой // *Жилищное строительство*. 2026. № 5. С. 3-9. DOI 10.31659/0044-4472-2026-5-3-9.
14. **Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцева И.А., Воронов В.А.** Организация технологии комфортного жизнеобеспечения в строениях с высоким классом энергоэффективности // *Строительное производство*. 2023. № 4. С. 77-82. DOI 10.54950/26585340_2023_4_77.
15. **Емелин В.А., Федосов С.В., Федосеев В.Н.** Программный комплекс для расчёта энергоэффективности теплонасосных систем с учётом климатических условий, режимов эксплуатации и многотарифного учета электроэнергии. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2026611184; опублик. 19.01.2026.
16. **Kelvin W.T.** Popular lectures and addresses: in 3 vol. 2nd ed. London: Macmillan, 1891.
17. **Колчунов В.И., Кореньков П.А., Федорова Н.В.** Программа экспериментальных исследований сложно напряженных узлов железобетонных конструкций // *Вестник МГСУ*. 2025. Т. 20. № 8. С. 1165-1177. DOI 10.22227/1997-0935.2025.8.1165-1177.

Поступила в редакцию 28.06.2026

Одобрена после рецензирования 14.07.2026

Принята к опубликованию 25.08.2026



REFERENCES

1. **Granovskii, V.L.** (2022), Energy efficiency and carbon footprint of a building. Target performance standardization, *Energy Saving*, no. 8, pp. 22-28 (in Russian).
2. **Bubnov, A.E., Sapunova, A.A., Titunin, A.A. and Dubrovina, Yu.Yu.** (2025), The efficiency of using digital models for predicting the thermal conductivity of wood-mineral composites, *Smart Composite in Construction*, vol. 6, iss. 3, pp. 8-18 (in Russian) DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-8-18.
3. **Dolmatov, S.N.** (2025), Analysis of the potential market capacity and consumption volumes of wall building wood-mineral composite materials meant for individual developers, *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Materials. Constructions. Technologies*, no. 1 (33), pp. 29-46 (in Russian). <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2025.1.29>.
4. **Erofeev, V.T., Al, S.D.S., Fedortsov, A.P. and Fedortsov, V.A.** (2020), Biological corrosion of concrete, *Construction Materials*, no. 11, pp. 13-23 (in Russian). DOI 10.31659/0585-430X-2020-786-11-13-23.
5. **Pastushkov, P.P. and Gagarin, V.G.** (2021), Air permeability of modern mineral wool products, *Construction Materials*, no. 6, pp. 15-20 (in Russian). DOI 10.31659/0585-430X-2021-792-6-15-20.
6. **Lykov, A.V.** (1967), Theory of Heat Conduction, Vysshaya Shkola, Moscow, 599 p. (in Russian).
7. **Lykov, A.V. and Mikhailov, Iu.A.** (1963), Theory of Heat and Mass Transfer, Gosenergoizdat, Moscow, 536 p. (in Russian).
8. **Fedosov, S.V.** (2010), Heat and Mass Transfer in Technological Processes of the Construction Industry, PresSto, Ivanovo, 363 p. (in Russian).
9. **Bogomolov, A.N. and Fedosov, S.V.** (2004), Mathematical Modeling of Heat and Mass Transfer Processes in Building Physics, ISPU, Ivanovo, 256 p. (in Russian).
10. **Gebhart, B., Jaluria, Y., Mahajan, R. and Sammakia, B.** (1991), Buoyancy-Induced Flows and Transport, Mir, Moscow, 678 p. (in Russian).
11. **Abiev, R.S.** (2020), Hydrodynamics and heat transfer of circulating two-phase Taylor flow in microchannel heat pipe: experimental study and mathematical model, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 59, no. 9, pp. 3687-3701. DOI 10.1021/acs.iecr.9b04834.
12. **Fedosov, S.V., Fedoseev, V.N. and Voronov, V.A.** (2022), Numerical-analytical method for reducing unsteady heat conduction problems with boundary conditions of the III kind to problems with conditions of the I kind, *Construction Materials*, no. 12, pp. 59-62 (in Russian). DOI 10.31659/0585-430X-2022-809-12-59-62
13. **Fedosov, S.V., Fedoseev, V.N., Voronov, V.A. and Emelin, V.A.** (2026), Practice of technical engineering solutions in construction facilities with an integrated heat exchange and heat pump system, *Housing Construction*, no. 5, pp. 3-9 (in Russian). DOI 10.31659/0044-4472-2026-5-3-9.
14. **Fedosov, S.V., Fedoseev, V.N., Zaitseva, I.A. and Voronov, V.A.** (2023), Organization of comfortable life support technology in buildings with high energy efficiency class, *Construction Production*, no. 4, pp. 77-82 (in Russian). DOI 10.54950/26585340_2023_4_77.
15. **Emelin, V.A., Fedosov, S.V. and Fedoseev, V.N.** (2026), Software package for calculating the energy efficiency of heat pump systems taking into account climatic conditions, operating modes and multi-tariff electricity metering, Certificate of Registration of Computer Program RU 2026611184, January 19, 2026 (in Russian).
16. **Kelvin, W.T.** (1891), Popular Lectures and Addresses, Macmillan, London; New York, 3 vol., 2nd ed.
17. **Kolchunov, V.I., Korenkov, P.A. and Fedorova, N.V.** (2025), Program of experimental studies of highly stressed joints of reinforced concrete structures, *Bulletin of MGSU*, vol. 20, no. 8, pp. 1165-1177 (in Russian). DOI 10.22227/1997-0935.2025.8.1165-1177.

Received 28.06.2025

Approved 14.07.2026

Accepted 25.08.2026