

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.115

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-8-18

Эффективность использования цифровых моделей для прогнозирования теплопроводности древесно-минерального композита

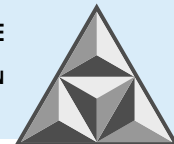
А.Е. Бубнов, А.А. Сапунова, А.А. Титунин, Ю.Ю. Дубровина

**Антон Евгеньевич Бубнов¹, Анастасия Александровна Сапунова^{1,*}, Андрей Александрович Титунин^{1,2},
Юлия Юрьевна Дубровина¹**

¹Костромская государственная сельскохозяйственная академия, Кострома, Российская Федерация

²Костромской государственный университет, Кострома, Российская Федерация

tosha1144@gmail.com, krilovaaa@yandex.ru, a_titunin@kosgos.ru, dubrovina_yy@mail.ru*



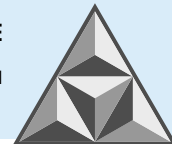
Рассматривается проблема выбора рационального состава древесно-минеральных композитов (ДМК) с использованием программного комплекса Comsol Multiphysics. Экспериментальная часть описывает процесс изготовления таких композитов в лабораторных условиях с включением магнезита и древесных опилок, а также представляет сравнительную оценку традиционного инструментального метода определения их теплопроводности с данными, получаемыми при использовании современных цифровых моделей. Доказана высокая эффективность применения цифрового моделирования состава и структуры строительного композита при исследовании теплопроводящих свойств ДМК. Подтверждена гипотеза о значимости влияния соотношения компонентов в смеси на коэффициент теплопроводности ДМК. Цифровая модель структуры композита позволит в будущем существенно сократить трудозатраты и время на проведение исследований такого рода.

Ключевые слова: древесно-минеральный композит, древесные опилки, магнезит, теплопроводность, программный комплекс Comsol Multiphysics, цифровые модели

Для цитирования:

Бубнов А.Е., Сапунова А.А., Титунин 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.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6456/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-8-18



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-8-18

The efficiency of using digital models for predicting the thermal conductivity of wood-mineral composites

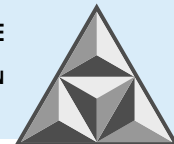
A.E. Bubnov, A.A. Sapunova, A.A. Titunin, Yu.Yu. Dubrovina

Anton E. Bubnov¹, Anastasiya A. Sapunova^{1,*}, Andrey A. Titunin^{1,2}, Julia Yu. Dubrovina¹

¹Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma, Russian Federation

²Kostroma State University, Kostroma, Russian Federation,

tosha1144@gmail.com, krilovaaa@yandex.ru, a_titunin@kosgos.ru, dubrovinayy@mail.ru*



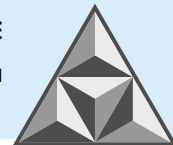
This paper addresses the problem of selecting the optimal composition of wood-mineral composites (WMC) using the COMSOL Multiphysics software complex. The experimental part describes the laboratory process of manufacturing such composites with the inclusion of magnesite and wood sawdust, and provides a comparative assessment of the traditional instrumental method for determining their thermal conductivity versus a method based on modern digital models. The high efficiency of using digital modeling of the composition and structure of a building composite for investigating the thermal conductive properties of WMC is proven. The paper confirms the hypothesis on the significant impact of the component ratio in the mixture on the thermal conductivity coefficient of WMC. The digital model of the composite's structure will significantly reduce labor costs and time for conducting such research in the future.

Keywords: wood-mineral composite, wood sawdust, magnesite, thermal conductivity, COMSOL Multiphysics software package, digital models

For citation:

Bubnov A.E., Sapunova A.A., Titunin A.A., Dubrovina Yu.Yu. The efficiency of using digital models for predicting the thermal conductivity of wood-mineral composites // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 3. P. 8-18. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6456/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-8-18



ВВЕДЕНИЕ

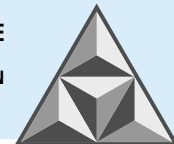
Современные технологии производства строительных материалов требуют постоянного совершенствования и оптимизации составов смесей. Одним из актуальных направлений является использование древесно-минеральных композитов (ДМК), которые находят широкое применение в самых различных отраслях, включая строительство и производство мебели. Это объясняется тем, что, наряду с высокой тепловой эффективностью и низкими удельными затратами на изготовление композитов, все больше внимания уделяется вопросам экологической безопасности применяемых материалов. Признанным фактом является то, что материалы на основе древесины являются более экологичными, чем традиционные (кирпич, газосиликат или бетон), и это может обеспечить комфортные и безопасные условия проживания. Кроме того, композиты на основе древесины имеют высокие теплоизоляционные показатели [1]. При этом, ввиду значительной вариабельности фракционного и породного состава древесного наполнителя, его плотности и влажности, подбор рационального состава смеси представляет собой проблему, требующую значительных затрат на изготовление опытных образцов [2-5].

Существует большое количество программ, позволяющих проводить комплексные расчеты и анализ материалов и строительных конструкций. Однако очень важно учитывать множество факторов, определяющих в итоге их эксплуатационные свойства [2]. В данной работе рассматривается эффективность применения цифровых моделей на основе программного комплекса (ПК) *Comsol Multiphysics* для анализа теплопроводности ДМК с достигаемым эффектом снижения трудозатрат и продолжительности эксперимента.

Comsol Multiphysics – мощная интерактивная среда для моделирования и расчетов научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных методом конечных элементов. С этим программным пакетом можно расширять стандартные модели, использующие одно дифференциальное уравнение (прикладной режим) для расчета связанных между собой физических явлений [4].

Программа разработана в начале 2000-х гг. в Швеции (Королевский технический университет; авторы Литман и Суиди). Затем она совершенствовалась коллективом программистов и исследователей фирмы *Softline* (президент Карл Биттнер). Программа первоначально формировалась как дополнение к *MathLab*, а затем включила все функции расчета уравнений в частных производных в собственный код. *Comsol Multiphysics* позволяет добавлять произвольные уравнения, характеризующие свойства материалов, вводить граничные условия и отдельные члены уравнений, описывающие источники и теплоотдачу, и даже системы уравнений в частных производных. На основе выведенных уравнений могут создаваться новые физические объекты [5].

Основная проблема, с которой сталкиваются исследователи и производители [6, 7], заключается в необходимости определения рационального состава древесно-минерального композита, который обеспечивал бы требуемые эксплуатационные свойства. Традиционные методы требуют многократного изготовления опытных образцов с различным соотношением компонентов, что сопровождается существенными временными и финансовыми затратами. Ранее проведенные исследования [2] показали, что на изготовление одного состава смеси ДМК требуется в среднем 2 ч. Это время включает подготовку материалов, дозировку, смешивание древесного наполнителя, магнезита и других компонентов до получения однородной консистенции и формование образцов. Затем в течение 28 сут. (672 ч) происходит выдержка образцов. Такой период необходим для гидратации магнезимального вяжущего, удаления



излишков влаги и набора требуемой прочности ДМК. Данный этап очень важен для получения достоверных результатов измерения теплопроводности, так как структура материала должна стабилизироваться. Подготовка образцов и последующее измерение теплопроводности прибором ИПТ-МГ4 требуют в дальнейшем еще 2 ч с учетом количества дублированных опытов. Итого на изучение теплопроводности ДМК одного состава прямым методом требуется 676 ч. Временные затраты на определение теплопроводности ДМК с использованием созданных цифровых моделей определялись непосредственно в ходе экспериментальных исследований.

Цель работы – сокращение трудозатрат и времени на проведение исследований теплопроводности ДМК при тестировании новых смесей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения древесно-минерального композита в качестве матрицы [8] использовали каустический магнезит ПМК-83, ТУ 2611-001-62571670-2009 АО «Торговый дом «ХИМПЭК»; массовая доля (на абсолютно сухое вещество) – 87.9%. В качестве заполнителя использовали древесные отходы в виде стружки от четырехсторонних стружечных станков с контролируемым фракционным составом. Для затворения магнезиевого вяжущего использовали бишофит отечественного производства с содержанием шестиводного хлорида магния ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) - 97% [2].

Теплопроводность древесно-минерального композита на основе магнезиевого вяжущего определялась двумя методами: инструментальным (с использованием прибора ИПТ-МГ4) и методом цифрового моделирования (с использованием ПК *Comsol Multiphysics*).

Образцы древесно-минерального композита изготавливали при различном соотношении компонентов древесной стружки и магнезита, %: 30/70, 25/70, 20/80. Количество образцов для каждого состава ДМК было одинаковым (равным 4).



Рис. 1. Внешний вид образца с процентным соотношением 20/80 компонентов смеси

Fig. 1. Appearance of the sample with the ratio of mixture components, 20/80

Теплопроводность ДМК в программном комплексе *Comsol Multiphysics* определялась в два этапа. Первый этап – расчет эквивалентной теплопроводности древесной стружки с включениями воздуха; создание 2D модели (рис. 2), представляющей собой прямоугольную область древесных частиц с включениями воздуха, случайное распределение которых задавалось при помощи скрипта *Java API* [9].

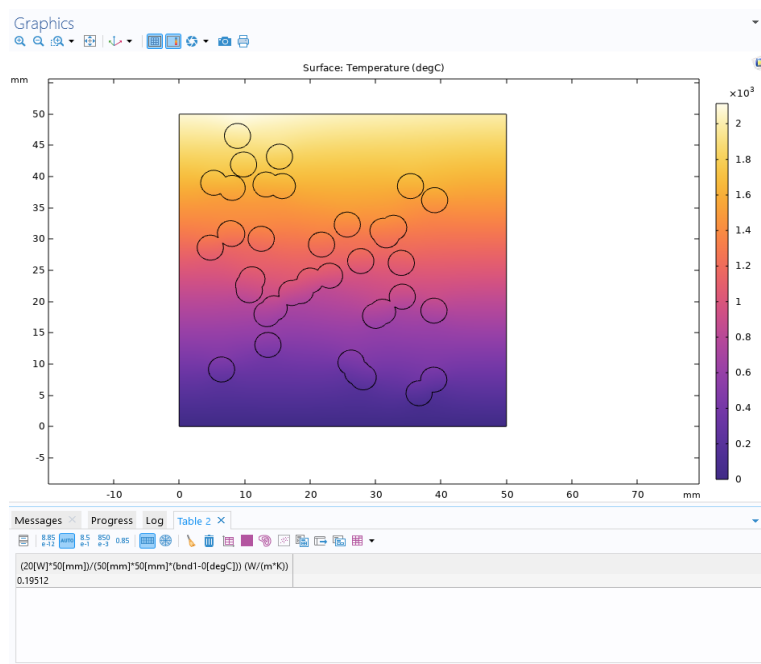
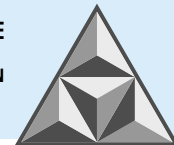


Рис. 2. Результат определения коэффициента теплопроводности древесной стружки с включениями воздуха для ДМК с соотношением компонентов 20/80 в ПК *Comsol Multiphysics*

Fig. 2. Result of determining the heat transfer coefficient of wood chips with air inclusions for wood-mineral composite with component ratio 20/80 in *Comsol Multiphysics*

Второй этап – нахождение коэффициента теплопроводности ДМК; создание 3D модели (рис. 3), представляющей собой геометрию куба из стружки, с включениями магнетита [9], распределенными при помощи *Java API* [10]. Для области, соответствующей древесной стружке, задается эквивалентная теплопроводность, рассчитанная на первом этапе (2D модель распределения древесной стружки с включениями воздуха).

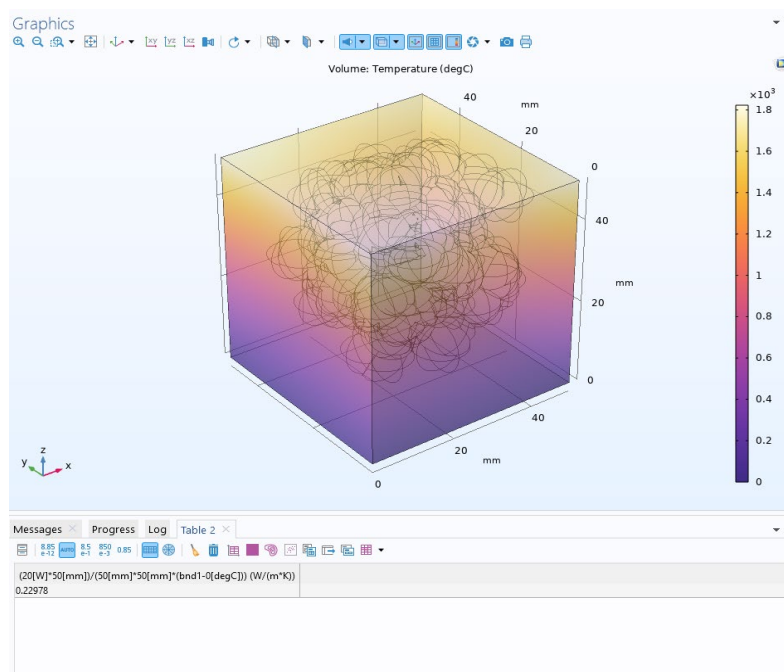
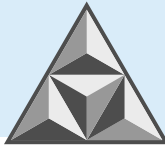


Рис. 3. Результат определения теплопроводности ДМК с соотношением компонентов 20/80 в ПК *Comsol Multiphysics*

Fig. 3. Result of determining the thermal conductivity of wood-mineral composite with a component ratio of 20/80 in *Comsol Multiphysics PC*



РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На этапе обсуждения результатов эксперимента проведено сравнение коэффициентов теплопроводности древесно-минерального композита, измеренных инструментальным методом и прогнозируемых, полученных с использованием цифровых моделей (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициент теплопроводности композита при различном соотношении компонентов

Table 1. Heat transfer coefficient of the composite at different component ratios

Соотношение компонентов Д:М, %	Воздух (%)	Коэффициент теплопроводности, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹						Отклонение от инструмен- тального метода (%)
		Инструментальный (прибор ИТП-МГ4)			Метод цифрового моделирования (ПК Comsol Multiphysics)			
		мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.	
30/70	30% ($\lambda = 0.17334$)	0.192	0.200	0.196	0.212	0.214	0.213	8.85
25/75	25% ($\lambda = 0.18373$)	0.217	0.225	0.221	0.219	0.221	0.220	0.54
20/80	20% ($\lambda = 0.19512$)	0.242	0.250	0.246	0.229	0.231	0.230	6.43

Из табл. 1 видно, что цифровое моделирование структуры ДМК в программном комплексе *Comsol Multiphysics* позволяет достаточно точно определить значение коэффициента теплопроводности, хотя и наблюдаются некоторые расхождения с инструментальным методом. Как известно, погрешность измерений с помощью прибора ИТП-МГ4 составляет 7%. Эти расхождения могут быть связаны с погрешностями измерений, неточностями моделирования или неоднородностью исследуемого материала.

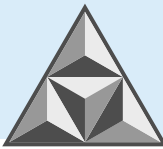
В ходе работы в ПК *Comsol Multiphysics* установлено, что на создание первых моделей (2D – древесная стружка и воздух; 3D – древесная стружка и магнезит) требуется время, равное 1.5 ч. Это включает в себя создание геометрии образца, написание кода *Java API* для случайного распределения частиц в плоскости модели, задание материалов и их свойств, создание сетки, настройку параметров и самого процесса расчета. Далее копирование существующих 2D и 3D моделей (включая геометрию, сетку, материалы, граничные условия), изменение параметров соотношения компонентов (стружка/магнезит, содержание воздуха) и выполнение расчетов компьютером заняло примерно 20 минут.

Использование метода цифрового моделирования структуры композита и использование ПК *Comsol Multiphysics* для изучения теплопроводности ДМК позволяет значительно быстрее и эффективнее проводить исследования, так как создание первых моделей займет всего 1.5 ч, а действия с изменением параметров существующих моделей потребуют 20 мин на каждый последующий расчет.

Из табл. 1 также видно, что при изменении соотношения компонентов смеси средние значения коэффициента теплопроводности, определенные методом цифрового моделирования, отличаются (от 0.007 до 0.010). В некоторых работах отмечалось, что увеличение размеров древесных частиц приводит к снижению теплопроводности ДМК. Композит при этом создавался на основе цемента и древесной «дробленки» [11]. Для проверки, значимы ли эти различия в нашем случае, использовали метод однофакторного дисперсионного анализа. В качестве изменяемого фактора (фактор А) принято соотношение компонентов древесного наполнителя и магнезита, %.

Фактор А изменяется на трех уровнях ($m = 3$): a_1 – 30/70, a_2 – 25/75, a_3 – 20/80. Число дублированных опытов $n = 4$ (на каждом уровне).

Выходная величина У – теплопроводность ДМК, Вт·м⁻¹·К⁻¹.



Результаты определения выходной величины и статистических параметров на разных уровнях фактора А приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты и статистические параметры уровней фактора А

Table 2. Results and statistical parameters of factor A levels

Уровни фактора А		Коэффициент теплопроводности ДМК, Y_{ij} , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	Среднее арифметическое уровня \bar{Y}_i	Дисперсия уровня S_i^2
Соотношение компонентов Д : М, %	Кодированное обозначение уровня			
30/70	a ₁	0.2141; 0.2137; 0.2119; 0.2137	0.2133	9.528·10 ⁻⁷
25/75	a ₂	0.2195; 0.2198; 0.2209; 0.2191	0.2198	5.624·10 ⁻⁷
20/80	a ₃	0.2298; 0.2300; 0.2304; 0.2306	0.2304	1.205·10 ⁻⁷

Проверка однородности дисперсий S_i^2 на трех уровнях фактора А по критерию Кохрена G_p показала, что дисперсии однородны: $G_p = 0.583$; $G_t = 0,8$ (при $q = 0.05$; $m = 3$; $f = 4 - 1 = 3$); $G_p < G_t$. Поэтому следующим шагом стало вычисление дисперсии фактора А, которая характеризует рассеяние между средними арифметическим на каждом уровне фактора (\bar{Y}_i) и общим средним по эксперименту (\bar{Y}):

$$S_A^2 = \frac{n}{m-1} \sum_{i=1}^m (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2, S_A^2 = 0.00029.$$

Остаточная дисперсия, которая характеризует среднее рассеяние в эксперименте между элементами выборки и средним арифметическим по всему эксперименту, была вычислена по формуле:

$$S_n^2 = \frac{1}{m(n-1)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{Y}_i)^2; S_n^2 = 5.452 \cdot 10^{-7}.$$

После этого проверена гипотеза о значимости влияния фактора А (соотношение компонентов смеси) на величину коэффициента теплопроводности. Для этого с помощью критерия Фишера оценивалась однородность дисперсии S_A^2 и остаточной дисперсии S_n^2 : расчетное значение критерия Фишера $F_p = 528.76$; табличное значение критерия Фишера $F_t = 4,26$ (при $q = 0,05$; $f_a = 2$; $f_n = 3 (4 - 1) = 9$).

Так как $F_p > F_t$, гипотеза о наличии эффекта взаимодействия между соотношением компонентов древесно-минерального композита и теплопроводностью подтверждается. При этом, с учетом большой разницы между F_p и F_t , можно утверждать о сильном влиянии соотношения компонентов смеси на коэффициент теплопроводности.

На завершающем этапе исследования нами выполнено попарное сравнение однородности средних арифметических на уровнях фактора А (по критерию Стьюдента).

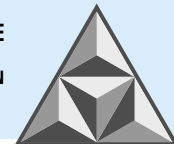
Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты проверки значимости различий

Table 3. Results of testing the significance of differences

Уровни фактора А	t_p	t_r	Значимость различий
a ₁ и a ₂	20.70	2.45	Значимы
a ₂ и a ₃	31.18	2.45	Значимы
a ₁ и a ₃	36.89	2.45	Значимы

Поскольку в трех случаях парного сравнения $t_p > t_r$, сделан вывод, что различия между уровнями фактора А значимы, причем они тем больше, чем больше значение t_p . Как и следовало



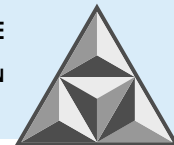
ожидать, максимальная разница получена между первым и третьим уровнем фактора A , а наименьшая – между первым и вторым. Это объясняется тем, что соотношение компонентов смеси ДМК определяется с учетом массы вещества. В этом случае, как отмечается в отдельных работах [2, 11], ввиду малой насыпной плотности древесной стружки даже незначительное увеличение массовой доли древесного наполнителя в составе смеси приводит к существенному увеличению объема. Следовательно, возрастает и количество воздушных включений, обладающих крайне низкой теплопроводностью. Поэтому при проведении дальнейших исследований, связанных с определением рационального состава ДМК, шаг варьирования доли компонентов не должен превышать 5%. Это позволит более точно определить соотношение компонентов смеси ДМК и максимально приблизиться к точке экстремума функции, описывающей изменение теплопроводности композита в зависимости от его состава.

ВЫВОДЫ

Разработанные в ПК *Comsol Multiphysics* модели структуры древесно-минерального композита позволяют с допустимой точностью прогнозировать его теплофизические свойства. Относительное отклонение коэффициентов теплопроводности, определенных с помощью цифровых моделей, от таковых, полученных инструментальным методом, сопоставимо с погрешностью измерений с использованием прибора ИТП-МГ4. Использование цифровых моделей древесно-минерального композита в программном комплексе *Comsol Multiphysics* дает возможность существенно сократить время и затраты на разработку новых составов. Полученные результаты подтверждают эффективность моделирования и его практическую значимость для определения рационального состава композитных материалов с требуемой теплопроводностью.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **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>.
2. **Сапунова А.А., Титуни А.А.** Влияние древесного наполнителя и магнезита на прочность композиционного материала // *Умные композиты в строительстве.* 2024. Т. 5. вып. 1. С. 19-30. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5049/view> (дата обращения 12.04.2025).
3. **Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцев И.С., Зайцева И.А.** Особенности использования отечественного и зарубежного инструментария имитационного моделирования строительных конструкций зданий и сооружений // *Умные композиты в строительстве.* 2023. Т. 4. вып. 2. С. 18-31. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5046/view> (дата обращения 02.04.2025).
4. **Бирюлин Г.В.** Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL/FEMLAB. СПбГУИТМО, 2006. 89 с.
5. **Курушин А.А.** Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL-M. «One-Book», 2016. 376 с.
6. **Halil T.S., Yasemin S.** Mineral-bonded wood composites: An alternative building materials. 2021. URL: <https://www.intechopen.com/online-first/78047>. DOI: 10.5772/intechopen.98988 (дата обращения 12.04.2025).
7. **Наназшвили И.Х.** Строительные материалы из древесноцементной композиции. СПб.: Стройиздат, 1990. 415 с.
8. **Шитова И.Ю., Самошина Е.Н., Кислицына С.Н., Болтышев С.А.** *Современные композиционные строительные материалы: учеб. пособие.* Пенза: ПГУАС, 2015. 136 с.



9. **Пугачев О.В., Хан З.Т.** Моделирование теплопроводности композита с шаровыми включениями // *Научный вестник МГТУ. Москва*, 2017. С. 83-93.
10. **Venkateswaran P., Malav R.** Utilization of Comsol Multiphysics Java API for the integration of composite material module with a Customized user interface // Comsol Conference 2014 Bangalore.
11. **Долматов С.Н., Никончук А.В.** Исследование показателей теплопроводности древесно-цементных композитов // *Хвойные бореальной зоны*. 2019. Т. 37. № 5. С. 341-346.

Поступила в редакцию 25.04.2025

Одобрена после рецензирования 13.07.2025

Принята к опубликованию 24.07.2025

REFERENCES

1. **Dolmatov, S.N.** (2025), "Analysis of the potential market capacity and consumption volumes of wall construction materials for individual developers in relation to the technology of wood-mineral composites", *Bulletin of the Volga State University of Technology. Ser.: Materials. Constructions. Technologies*, vol. 1, no. 33, pp. 29-46. Available at: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2025.1.29> (Accessed: 12.04.2025) (in Russian).
2. **Sapunova, A.A. and Titunin, A.A.** (2024), "Influence of the share of wood filler and magnesite on the strength of composite", *Smart Composite in Construction*, vol. 5, no. 1, pp. 19-30. Available at: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5049/view> (Accessed: 02.04.2025) (in Russian).
3. **Fedosov, S.V., Fedoseev, V.N., Zaitsev, I.S. and Zaitseva, I.A.** (2023), "Features of using domestic and foreign tools for simulation modeling of building structures", *Smart Composite in Construction*, vol. 4, no. 2, pp. 18-31. Available at: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5046/view> (Accessed: 02.04.2025) (in Russian).
4. **Biryulin, G.V.** (2006), *Teplofizicheskie raschety v konechno-elementnom pakete COMSOL/FEMLAB* [Thermophysical calculations in the finite element package COMSOL/FEMLAB]. Saint Petersburg: SPbGUITMO (in Russian).
5. **Kurushin, A.A.** (2016), *Reshenie multifizicheskikh SVCh zadach s pomoshch'yu SAPR COMSOL-M* [Solving multiphysics microwave problems using the CAD system COMSOL-M]. Moscow: One-Book (in Russian).
6. **Halil, T.S. and Yasemin, S.** (2021), *Mineral-bonded wood composites: An alternative building materials*. Available at: <https://www.intechopen.com/online-first/78047> (Accessed: 02.04.2025). DOI: 10.5772/intechopen.98988.
7. **Nanazashvili, I.Kh.** (1990), *Stroitel'nye materialy iz drevesno-tsementnoi kompozitsii* [Construction materials from wood-cement composition]. Leningrad: Stroyizdat (in Russian).
8. **Shitova, I.Yu., Soshina, E.N., Kislitsyna, S.N. and Boltyshev, S.A.** (2015), *Sovremennye kompozitsionnye stroitel'nye materialy* [Modern composite construction materials]. Penza: PGUAS (in Russian).
9. **Pugachev, O.V. and Khan, Z.T.** (2017), "Modeling the thermal conductivity of a composite with spherical inclusion", *Scientific Bulletin of Moscow State Technical University*. Moscow, pp. 83-93 (in Russian).
10. **Venkateswaran, P. and Malav, R.** (2014), "Utilization of Comsol Multiphysics Java API for the integration of composite material module with a Customized user interface", Comsol Conference 2014 Bangalore.
11. **Dolmatov, S.N. and Nikonchuk, A.V.** (2019), "Issledovanie pokazatelei teploprovodnosti drevesno-tsementnykh kompozitov" [Research on thermal conductivity indicators of wood-cement composites], *Khvoynye boreal'noj zony* [Conifers of the Boreal Zone], vol. 37, no. 5, pp. 341-346 (in Russian).

Received 25.04.2025

Approved 13.07.2025

Accepted 24.07.2025