

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 3. С. 228–240.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (3): 228–240.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.12

<https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-3-228-240>



EDN: IMGDKT

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МОНОЛИТНОГО ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ЗАПОЛНЕНИЯ В 3D-ПЕЧАТНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Любовь Владимировна Закревская, Елизавета Анатольевна Репина
*Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,
г. Владимир, Россия*

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности и экологической безопасности в строительстве с внедрением технологий 3D-печати. В условиях важности утилизации растительных отходов особую значимость приобретает использование костры технической конопли как альтернативного теплоизоляционного материала для заполнения несъемной опалубки, что соответствует современным тенденциям «зеленого» строительства.

Цель работы – изучение возможности использования костры технической конопли в роли органического заполнителя. Новизна исследования заключается в численном анализе теплового состояния стенового блока, выполненного по технологии 3D-печати, где несъемная опалубка из песчано-цементной смеси заполнена костробетоном. Проведена оценка теплопередачи при граничных условиях: температура окружающей среды на наружной поверхности $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, на внутренней $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты. Численный анализ нестационарных температурных режимов со скоростью изменения температуры $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ на температурных интервалах $[-25\dots-5\text{ }^{\circ}\text{C}]$ показал высокую инерционность стенового блока. Проведенный численный анализ температурных деформаций и температурных напряжений стенового блока из костробетона в оболочке из песчано-цементной смеси при экстремальном температурном интервале по критериям второй теории прочности и гипотезе Мора для зон с максимальным уровнем напряжений показал, что минимальные значения запасов прочности (1,14–2,7) обеспечивают необходимую надежность блока для данного перепада температур по наружной

и внутренней поверхностям, а для зон с максимальным уровнем температурных напряжений выявил, что минимальные значения запасов прочности (1,23–2,5) обеспечивают необходимую надежность блока на нестационарных температурных режимах.

Показана перспективность применения костробетона в качестве теплоизоляционного материала для 3D-печатного строительства, что способствует снижению энергопотребления зданий и расширяет возможности использования возобновляемого растительного сырья в строительной индустрии.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, теплоизоляция, костробетон, несъемная опалубка, органический наполнитель, смешанное вяжущее, теория Мора, метод конечных элементов

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ).

Для цитирования: Закревская, Л.В., Репина, Е.А. Разработка технологии монолитного теплоизоляционного заполнения в 3D-печатном строительстве // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 3. С. 228–240. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-3-228-240>. EDN: IMGDKT

ORIGINAL ARTICLE

MULTILAYER INSULATION TECHNOLOGY IN ADDITIVE MANUFACTURING IN CONSTRUCTION

Lyubov V. Zakrevskaya, Elizaveta A. Repina

Vladimir State University, Vladimir, Russia

Abstract. The relevance is determined by the need to enhance the energy efficiency and environmental safety in construction through the implementation of 3D printing. Given the necessity for the disposal of plant waste, the use of hemp scutch as alternative thermal insulation for filling a dead formwork becomes particularly significant, aligning with modern trends in green construction.

Purpose: The aim of this work is to investigate the feasibility of using hemp scutch as an organic filler. The heat transfer was analyzed under the boundary conditions, i.e., ambient temperature on the outer (–30 °C) and inner (20 °C) surfaces.

Research findings: The numerical analysis at a temperature change rate of 4 °C/hour within –25 to –5 °C shows a high inertia of the wall element. The numerical analysis is conducted for temperature strain and stress in the hemp scutch wall element with a sand-cement mixture shell under extreme temperatures. It is based on the maximum-strain of failure and Mohr–Coulomb theories for zones with maximum stress levels and shows that the lowest safety margins (1.14–2.7) provide the required reliability of the wall element for this temperature differential across the outer and inner surfaces. The lowest safety margins (1.23–2.5) for zones with maximum thermal stress levels provide the required reliability at transient temperatures.

Originality/value: The hempcrete potential is shown for using it as a thermal insulation material in 3D printing, contributing to reduced energy consumption of buildings and expanding the use of renewable plant materials in the construction industry. The numerical analysis of the thermal state of the wall element obtained by 3D printing, where a dead formwork made of sand-cement mixture is filled with hempcrete.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, thermal insulation, hempcrete, dead formwork, organic filler, mixed binder, Mohr–Coulomb theory, finite element method

Funding: Research was carried out under the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Line FZUN-2024-0004).

For citation: Zakrevskaya, L.V., Repina, E.A. Multilayer Insulation Technology in Additive Manufacturing in Construction. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28(3): 228–240. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-3-228-240>. EDN: IMGDKT

Введение

Наука и техника в современном мире развиваются стремительными темпами, и строительство как одна из самых масштабных сфер деятельности человека не является исключением. Технология трехмерной печати начала развиваться во второй половине XX в., и спустя недолгое время были сконструированы первые 3D-принтеры. Эти устройства функционируют на основе принципа пошагового, послойного формирования физического объекта из цифровой трехмерной модели. В публикации Н.Ш. Мустафина и А.А. Барышникова [1] указано, что изначально 3D-принтеры использовались преимущественно для создания опытных образцов, предшествующих запуску массового производства. Однако в последние годы наблюдается активизация исследований, направленных на внедрение 3D-печати в строительную сферу.

Современный инвестиционный сектор на глобальном уровне претерпевает заметные инновационные трансформации, связанные с использованием 3D-печатающих устройств. Активное внедрение аддитивных методов оказывает значительное влияние на перераспределение экономических аспектов в строительстве. Технология объемной печати зданий и сооружений открывает широкий спектр новых возможностей, т. к. строительство остается одной из последних производственных отраслей, не охваченных полной автоматизацией. Как отмечают Е.А. Симаков, К.И. Селяков и Д.П. Кравченко, применение 3D-принтеров в строительстве делает актуальными вопросы механизации процессов, упрощения технологических схем, снижения себестоимости продукции, ускорения сроков возведения объектов и сокращения доли ручного труда [2].

В контексте общемирового тренда цифровизации экономики особое значение приобретает развитие 3D-аддитивных методов при производстве малых архитектурных форм, отдельных элементов конструкций, а также малоэтажного строительства с возможностью быстрой последующей отделки. Согласно статье А.С. Иноземцева, Е.В. Королева и Зыонг Тхань Куй, процесс трехмерной печати включает цифровое моделирование объекта, разбиение модели на двумерные слои посредством специализированного программного обеспечения, а затем – автоматизированное управление устройством для послойного нанесения строительного материала по заданным координатам [3].

Применение 3D-принтеров охватывает широкий спектр задач – от производства отдельных блоков и декоративных элементов до возведения зданий. Эта технология особенно актуальна для регионов, пострадавших от природных катастроф, а также для быстрого возведения жилья в развивающихся странах. В исследовании В.П. Грахова, С.А. Мохначева, О.В. Бороздова [4] описывается влияние развития 3D-технологий на экономику строительства. Эти технологии

позволяют создавать конструкции высокой сложности при минимальных затратах времени и ресурсов и открывают возможности для проектирования зданий с нетипичной геометрией – криволинейными фасадами и нестандартными очертаниями. Автоматизация процессов способствует снижению численности рабочих и уменьшению производственных рисков. В настоящее время наблюдается переход от опытных установок к промышленному использованию строительной 3D-печати.

В России основное внимание уделяется выполнению нормативных показателей по термическому сопротивлению ограждающих конструкций. Согласно статье Н. Лабоннота, А. Ронквиста, Б. Манума и П. Рютера, достижение соответствующих значений сопротивления теплопередаче возможно при использовании многослойных конструкций, сочетающих легкие теплоизоляционные и прочные конструкционные материалы [5]. Одним из важных факторов успешной реализации 3D-технологий в строительстве является разработка смесей, адаптированных к технологии печати. Поэтому актуальным становится научное обоснование требований и условий получения эффективных теплоизоляционных материалов, пригодных для применения в 3D-печати. В этом вопросе важно, чтобы сырьевая база для создания теплоизоляционных материалов и конструкционных композитов была родственной по составу [6, 7].

Использование традиционных утеплителей, таких как минеральная вата или пенополистирол, малоприспособно при формировании сложных архитектурных форм из-за риска образования пустот при изогнутых поверхностях фасада. В условиях 3D-печати, где элементы фасада имеют нестандартные формы, применение гибких и адаптируемых к сложной геометрии теплоизоляционных решений становится особенно важным [8].

Необходимо, чтобы применяемые материалы обеспечивали низкий коэффициент теплопроводности, достаточную влагостойкость, биологическую и химическую стойкость. При этом нужно учитывать региональные климатические особенности и требования нормативной документации [9].

Одним из биологически чистых и полезных для человека материалов является костра технической конопли [10]. Техническая конопля может использоваться в качестве наполнителя и фибры. При прядильном производстве у производителей возникает большая проблема по утилизации ее отходов. Их объем достигает 65–75 % от объема исходного сырья. При этом одним из приоритетных направлений является необходимость вовлечения отходов промышленности в создание новых строительных материалов. Использование такого рода материала помогает не только снизить экономическую составляющую разработанного композита, но и утилизировать вторичный продукт, снизив экологическую нагрузку. Наиболее широко костра применяется для строительства малоэтажных домов и коттеджей с деревянным каркасом. Также она используется в качестве утепления и звукоизоляции полов, стен и крыш [11].

Костробетон – натуральный строительный материал, который состоит из рубленной конопляной костры, а также вяжущего и затворителя [12]. В работе «Characteristics of cement-based thermo-concretes containing capric acid impregnated hemp for thermal energy storage and sound isolation in buildings» [13] рассматриваются результаты исследования использования трех альтернативных компонентов,

изготовленных из органических материалов, таких как конопляная костра, пиролизированный уголь (древесный уголь), шлак мусоросжигательного завода или твердых бытовых отходов. Как ранее было изучено [14], улучшение изоляционной и теплоаккумулирующей способности костробетона имеет решающее значение для энергоэффективности и снижения воздействия на окружающую среду. Поэтому задачей настоящего исследования является изучение физико-механических и теплоизоляционных свойств многослойной конструкции, а также оценка возможности внедрения костробетона как теплоизоляционного слоя для 3D-печати.

Материалы и методы исследований

Исследования проводились на базе Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. Подбор материалов и изучение их свойств осуществлялось в соответствии с методиками, изложенными в государственных стандартах. В проводимых экспериментах применялось современное оборудование и приборы кафедры «Строительное производство». Исследование теплового состояния проводилось с использованием CAE-комплекса SOLIDWORKS Simulation.

Структура объекта исследования представляет собой оболочку толщиной 45 мм, выполненную 3D-принтером из песчано-цементной смеси. Оболочка заполнена костробетоном толщиной 410 мм (рис. 1, 2).

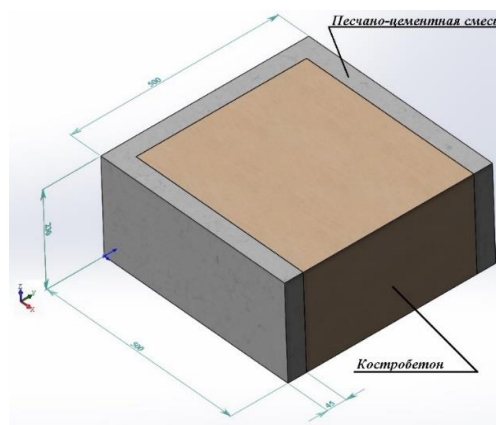


Рис. 1. 3D-модель объекта исследования
Fig. 1. 3D model of multilayer insulation



Рис. 2. Внешний вид объекта исследования
Fig. 2. Multilayer insulation

Теплофизические и механические характеристики песчано-цементной смеси и костробетона приведены в табл. 1 [15, 16].

Для моделирования температурного поля фрагмента стенового блока при постоянном и изменяющемся перепаде температур окружающей среды на наружной и внутренней поверхностях применялся подход, основанный на решении нестационарной задачи теплопроводности методом конечных элементов, реализованным в современных CAE-комплексах [17, 18].

Таблица 1

Теплофизические и механические характеристики
песчано-цементной смеси и костробетона

Table 1

Thermal and mechanical parameters of sand-cement mixtures and hempcrete

Компоненты опалубки	Песчано-цементная смесь	Костробетон
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·К	0,9	0,09
Плотность ρ , кг/м ³	1900	400
Теплоемкость C_m , Дж/кг·К	840	2300
Коэффициент температурного расширения α_t , 1/К	0,0000145	0,0000056
Модуль упругости E , МПа	20 000	1500
Коэффициент Пуассона	0,18	0,2
Предел прочности при сжатии, МПа	40–50	2,5
Предел прочности при растяжении, МПа	6,5–8	0,7

Для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) стенового блока использовалась вариационная постановка задачи термоупругости, решение которой основывалось на методе конечных элементов, реализованном в современных САЕ-комплексах. Моделирование теплового состояния фрагмента стенового блока наружной стены при перепаде температур окружающей среды на наружной и внутренней поверхностях от -30 до $+20$ °С базировалось на решении стационарной задачи теплопроводности методом конечных элементов с использованием САЕ-комплексов.

Задача определения поля температур фрагмента стенового блока решалась на основе вариационных принципов, реализованных в методе конечных элементов.

Метод конечных элементов базируется на вариационных принципах, функционал которых имеет вид

$$\Phi(T) = \frac{1}{2} \int_V \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 dV + \int_V \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} T dV - \int_V Q T dV - \int_{S_\alpha} \alpha (T_\infty - T)^2 dS + \int_{S_q} q_0 T dS, \quad (1)$$

где V – область интегрирования; S_q , S_α – площади поверхностей, для которых заданы граничные условия второго и третьего рода соответственно.

Функционал для конечно-элементной модели представляется суммой функционалов отдельных элементов

$$\Phi = \sum_{e=1}^n \Phi_e,$$

где n – число элементов модели.

Решение задачи теплопроводности на базе конечно-элементного анализа сводится к минимизации функционала на множестве узловых значений температур [1].

В результате минимизации функционала

$$\frac{\partial \Phi(T)}{\partial \{T\}} = \sum_{e=1}^n \frac{\partial \Phi_e(T)}{\partial \{T\}} = 0 \quad (2)$$

получаем систему линейных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$[H]\{T\} + [c] \frac{\partial}{\partial \tau} \{T\} = \{F\}, \quad (3)$$

где $[H] = \sum_{e=1}^n [H]_e$ – глобальная матрица теплопроводности; $[c] = \sum_{e=1}^n [c]_e$ – глобальная матрица теплоемкости; $\{F\} = \sum_{e=1}^n \{f\}_e$ – глобальный вектор тепловой нагрузки.

С учетом полученных зависимостей были созданы трехмерная и конечно-элементная модели, представленные на рис. 3. Конечно-элементная модель состояла из 308 943 узлов и 1 752 202 четырехузловых пирамидальных элементов с размером ребра 5 мм. Тепловые потоки на соответствующих поверхностях в расчетной модели задавались с помощью граничных условий III рода (α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К), T – температура окружающей среды).

На наружной поверхности коэффициент теплоотдачи принимался для наружных стен, покрытий, перекрытий над проездами и над холодными (без ограждающих стенок) подпольями в Северной строительной климатической зоне, т. е. $\alpha = 23$ Вт/(м²·°К). Для внутренней поверхности коэффициент теплоотдачи принимался для стен, полов, гладких потолков, потолков с выступающими ребрами при отношении высоты h ребер к расстоянию, а между гранями соседних ребер $h/a \leq 0,3$, т. е. $\alpha = 8,7$ Вт/(м²·°К) [19].

Исследование теплового и напряженно-деформированного состояния стенового блока наружной стены предусматривает в том числе построение эпюр вдоль ребер 3D-модели. Обозначение и расположение ребер представлено на рис. 4.

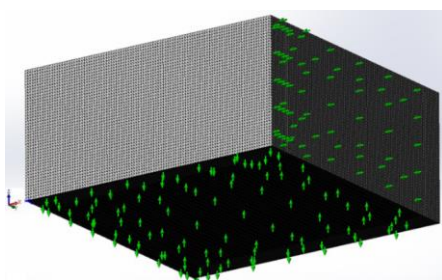


Рис. 3. Трехмерная (3D) конечно-элементная модель фрагмента стенового блока с указанием КГУ

Fig. 3. FEM of wall element fragment with indicated KGU

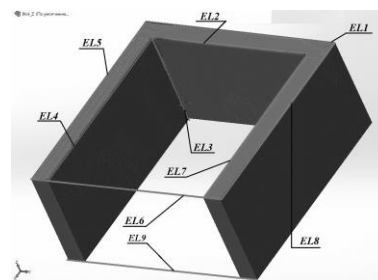


Рис. 4. Обозначение и расположение ребер для построения эпюр при обработке результатов расчетов

Fig. 4. Schematic of edges for plotting diagrams in processing calculation results

Результаты эксперимента и их обсуждение

Температурное поле стенового блока наружной стены представлено на рис. 5. Изменения температуры по ребру *EL1*, относящемуся к оболочке, выполненной из песчано-цементной смеси, и по ребру *EL6*, относящемуся к среднему сечению рассчитываемого блока, представлены на рис. 6. Минимальная температура на наружной поверхности стенового блока составила $-29,7^{\circ}\text{C}$, максимальная на этой же поверхности составила $-28,1^{\circ}\text{C}$. На внутренней поверхности стенового блока максимальная температура составила $-18,6^{\circ}\text{C}$, минимальная на этой же поверхности составила $-15,4^{\circ}\text{C}$.

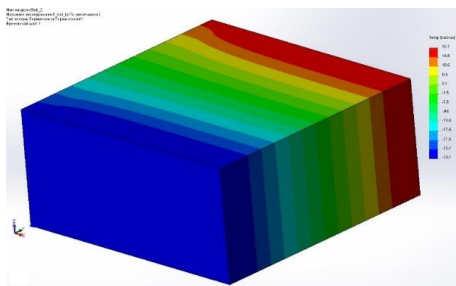


Рис. 5. Температурное поле стенового блока наружной стены

Fig. 5. Temperature field of the outer wall element

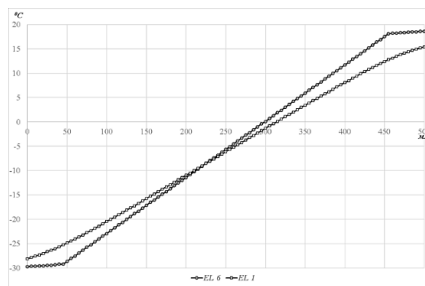


Рис. 6. Изменение температуры стенового блока наружной стены по ребрам *EL1* и *EL6*

Fig. 6. Temperature curves of outer wall element along the edges *EL1* and *EL6*

Из рис. 6 следует, что среднее значение температурного перепада на внутренней поверхности стенового блока составило 2°C , что в два раза меньше нормируемого температурного перепада для жилых, лечебно-профилактических и детских учреждений, школ ($\Delta t_n = 4^{\circ}\text{C}$) [20].

Анализ результатов моделирования НДС стенового блока показал, что размах напряжений цикла нагружения формирует пиковые значения в крайних точках температурного цикла на наружной поверхности блока (при -25 и -5°C). При анализе результатов моделирования НДС стенового блока была определена зона концентрации напряжений – ребро *EL3* на внутренней поверхности песчано-цементной оболочки, находящейся между ребрами *EL1* и *EL6*. Можно предположить, что максимальные напряжения песчано-цементной оболочки находятся в области, прилегающей к ребру *EL3*, и выходят на свободно деформируемую поверхность (узлы 46 259, 46 316 и узел 1451, принадлежащий ребру *EL3*). Экстремальные значения компонентов тензора, главных и эквивалентных напряжений для данных температур приведены в табл. 2, 3.

Результаты численного анализа нестационарных температурных режимов со скоростью изменения температуры $4^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ на температурных интервалах $[-25 \dots -5^{\circ}\text{C}]$ показали высокую инерционность стенового блока. Изменение температуры внутри блока на расстоянии 100–120 мм от внутренней поверхности не превышает 3°C , размах напряжений цикла нагружения создают НДС в крайних точках цикла изменения температуры окружающей среды на наружной поверхности блока, т. е. при -25 и -5°C .

Таблица 2

Экстремальные значения тензора, главных и эквивалентных напряжений в контрольных точках, принадлежащих песчано-цементной оболочке

Table 2

Extreme values of tensor, principal, and equivalent stresses at reference points of sand-cement shell

Датчик	T, °C	σ_x , МПа	σ_y , МПа	σ_z , МПа	τ_{xy} , МПа	τ_{yz} , МПа	τ_{zx} , МПа	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа	σ_{Mises} , МПа	σ_{III} , МПа
Узел 46 316	-25	4,08	0,28	0,41	-3,09	-0,05	0,01	5,81	0,41	-1,45	6,53	7,26
	-5	2,50	0,18	0,24	-1,90	-0,03	0,00	3,56	0,24	-0,88	4,00	4,44
Узел 46 259	-25	0,31	3,73	0,25	-3,35	0,04	0,25	5,79	0,25	-1,75	6,77	7,54
	-5	0,20	2,29	0,15	-2,05	0,02	0,15	3,55	0,15	-1,06	4,14	4,61
Узел 1451 (EL3)	-25	2,47	2,79	0,21	-3,19	-0,02	0,42	5,85	0,28	-0,66	6,09	6,50
	-5	1,52	1,72	0,12	-1,95	-0,01	0,25	3,58	0,17	-0,39	3,73	3,98

Таблица 3

Экстремальные значения тензора, главных и эквивалентных напряжений в контрольных точках, принадлежащих внутренней части блока

Table 3

Extreme values of tensor, principal and equivalent stresses at reference points of inner wall element

Датчик	T, °C	σ_x , МПа	σ_y , МПа	σ_z , МПа	τ_{xy} , МПа	τ_{yz} , МПа	τ_{zx} , МПа	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа	σ_{Mises} , МПа	σ_{III} , МПа
Узел 6181	-25	-0,255	-0,19	-0,15	-0,575	0,18	0,015	0,375	-0,145	-0,825	1,042	1,200
	-5	-0,15	-0,115	-0,09	-0,355	0,11	0,01	0,235	-0,085	-0,505	0,643	0,740
Узел 6044	-25	-0,37	-0,255	-0,275	-0,535	0,005	0,28	0,3	-0,295	-0,905	1,044	1,205
	-5	-0,22	-0,155	-0,165	-0,33	0	0,17	0,19	-0,175	-0,555	0,645	0,745
Узел 5958	-25	-0,09	0,115	-0,005	-0,355	0	0	0,38	-0,005	-0,355	0,637	0,735
	-5	-0,05	0,07	-0,005	-0,22	0	0	0,235	-0,005	-0,22	0,394	0,455
Узел 5015	-25	-0,285	0,445	-0,005	-0,005	0	-0,01	0,445	-0,005	-0,285	0,638	0,730
	-5	-0,17	0,27	0	0	0	-0,005	0,27	0	-0,17	0,384	0,440

Результаты прочностного анализа по критериям второй теории прочности и гипотезе Мора для зон с максимальным уровнем напряжений для оболочки из песчано-цементной смеси и внутреннего объема представлены в табл. 4, 5.

Проведенный численный анализ температурных деформаций и температурных напряжений стенового блока из костьбетона в оболочке из песчано-цементной смеси при температурном интервале от -25 до -5 °C по критериям второй теории прочности и гипотезе Мора для зон с максимальным уровнем напряжений показал, что минимальные значения запасов прочности (1,14–2,7) обеспечивают необходимую надежность блока для данного перепада температур по наружной и внутренней поверхностям.

Таблица 4

Результаты прочностного анализа по критериям второй теории прочности и гипотезе Мора для оболочки из песчано-цементной смеси

Table 4

Strength analysis based on maximum-strain of failure and Mohr–Coulomb theory for a sand-cement mixture shell

Датчик	T, °C	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа	σ_{eqvM} , МПа	Запас прочности по гипотезе Мора	σ_{eqv+} , МПа	Запас по второй теории прочности
Узел 46 316	–25	5,81	0,41	–1,45	6,042	1,324	5,997	1,334
	–5	3,56	0,24	–0,88	3,701	2,162	3,675	2,177
Узел 46 259	–25	5,79	0,25	–1,75	6,070	1,318	6,060	1,320
	–5	3,55	0,15	–1,06	3,720	2,151	3,714	2,154
Узел 1451 (EL3)	–25	5,85	0,28	–0,66	5,956	1,343	5,918	1,352
	–5	3,58	0,17	–0,39	3,642	2,196	3,620	2,210

Таблица 5

Результаты прочностного анализа по критериям второй теории прочности и гипотезе Мора для внутреннего объема

Table 5

Results of strength analysis based on maximum-strain of failure and Mohr–Coulomb theory for inner volume

Датчик	T, °C	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа	σ_{eqvM} , МПа	Запас прочности по гипотезе Мора	σ_{eqv+} , МПа	Запас по второй теории прочности
Узел 6181	–25	0,375	–0,145	–0,825	0,606	1,155	0,569	1,230
	–5	0,235	–0,085	–0,505	0,376	1,860	0,353	1,983
Узел 6044	–25	0,3	–0,295	–0,905	0,553	1,265	0,540	1,296
	–5	0,19	–0,175	–0,555	0,345	2,027	0,336	2,083
Узел 5958	–25	0,38	–0,005	–0,355	0,479	1,460	0,452	1,549
	–5	0,235	–0,005	–0,22	0,297	2,360	0,280	2,500
Узел 5015	–25	0,445	–0,005	–0,285	0,525	1,334	0,503	1,392
	–5	0,27	0	–0,17	0,318	2,204	0,304	2,303

Оценка прочности блока по критериям второй теории прочности и гипотезе Мора для зон с максимальным уровнем температурных напряжений показала, что минимальные значения запасов прочности (1,23–2,5) обеспечивают необходимую надежность блока на нестационарных температурных режимах.

Заключение

В работе исследована возможность использования костробо́тона в качестве теплоизоляционного материала для 3D-печати. Представлен численный анализ теплового состояния стенового блока из костробо́тона в оболочке из песчано-цементной смеси при температуре окружающей среды на наружной

поверхности -30 и 20 °C на внутренней, который показал его высокие теплоизолирующие характеристики. Результаты анализа нестационарных температурных режимов также показали высокую инерционность стенового блока.

На основании проведенного исследования можно сделать вывод о том, что предлагаемый вариант заполнения 3D-опалубки костробоном обладает значительным потенциалом для применения в современном строительстве. Проведенный анализ температурных деформаций и температурных напряжений стенового блока при экстремальном температурном интервале для зон с максимальным уровнем напряжений выявил, что минимальные значения запасов прочности обеспечивают необходимую надежность блока для данного перепада температур по наружной и внутренней поверхностям, а для зон с максимальным уровнем температурных напряжений – при нестационарных температурных режимах.

Результаты численного моделирования подтверждают, что костробоном сохраняет прочность и стабильность даже при резких перепадах температур, что расширяет географию его применения, включая регионы с суровым климатом. Его главные преимущества – низкий коэффициент теплопроводности, минимальная плотность, позволяющая отнести его к классу легких бетонов, экологичность и устойчивость к климатическим нагрузкам – позволяют его использовать в условиях повышенных требований к энергоэффективности и снижению негативного воздействия на окружающую среду. Разработанная технология подтверждена полученным патентом № 2835331 и практическим применением при строительстве одного из общественных зданий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мустафин, Н.Ш., Барышников, А.А. Новейшие технологии в строительстве. 3D-принтер // Региональное развитие. 2015. № 8. С. 13. EDN: VLJYDB
2. Симакова, Е.А., Селякова, К.И., Кравченко, Д. Применение 3D-печати в строительстве // Инженерные исследования. 2021 № 1 (1). С. 3–11. EDN: QZZTUT
3. Иноземцев, А.С., Королев, Е.В., Зыонг, Тхань Куй. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 7 (118). С. 863–876. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876
4. Грахов, В.П., Мохначев, С.А., Бороздов, О.В. Влияние развития 3D-технологий на экономику строительства // Фундаментальные исследования. 2014. № 11–12. С. 2673–2676. EDN: TRPFTB
5. Labonnote, N., Rönquist, A., Manum, B., Rüther, P. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities // Automation in Construction. 2016. V. 72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>
6. Mazur, K.E., Wardal, W.J., Barwicki, J., Tseyko, M. Thermal Insulation of Agricultural Buildings Using Different Biomass Materials // Energies. 2025. V. 18. № 3. P. 636. <https://doi.org/10.3390/en18030636>
7. Бондарев, Б.А., Баязов, В.А., Корнеев, О.О., Востриков, И.А., Мецераков, А.А., Корнеева, А.О. Подбор составов смесей для 3D-печати // Вестник Евразийской науки. 2021. Т. 13. № 3. DOI: 10.15862/29SAVN321. EDN: HCYDCG
8. Толстова, Ю.И. Основы строительной теплофизики: учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2014. 106 с. ISBN 978-5-7996-1131-6.
9. Bardouh, R., Toussaint, E., Amziane, S., Sandrine Marceau. Evaluating the Mechanical Performance of Bio-Based Concrete: The Role of Aggregate Type and Orientation in Compression Cyclic Loading // Cleaner Engineering and Technology. 2026. V. 30. P. 101–139. DOI: 10.1016/j.clet.2025.101139
10. Barnat-Hunek, D., Smarzewski, P., Brzyski, P. Properties of Hemp–Flax Composites for Use in the Building Industry // Journal of Natural Fibers. V. 14. № 3. 2017. P. 410–425. <https://doi.org/10.1080/15440478.2016.1212764>

11. Leclerc, W., Moudhaffar, N., Nguyen, D.M., Promis, G., Perré, P., Tran Le, A.D. Determination of the thermophysical properties of hemp shives using a methodology combining X-ray nanotomography and FFT-based numerical simulation // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. V. 251. 2025. P. 127–331. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127331>
12. Król, A., Janowska-Renkas, E., Klementowski, I., Pochwała, S. University of Opole Thermal insulation properties of ecological hemp concrete modified with fly ash from the energy sector // *Clean Techn Environ Policy*. 2025. V. 27. № 12. P. 8225–8233. <https://doi.org/10.1007/s10098-025-03225-6>
13. Gencel, O., Güler, O., Ustaoglu, A., Erdoğmuş, E., Sari, A., Hekimoğlu, G., Boztoprak, Y., Subaşı, S. Characteristics of cement-based thermo-concretes containing capric acid impregnated hemp for thermal energy storage and sound isolation in buildings // *Energy*. 2025. V. 329. Art. 136837. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136837>
14. Наназашвили, И.Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции. 2-е изд. перераб. и доп. Ленинград : Стройиздат, 1990. 415 с.
15. Пилипенко, Н.В. Тепловые потери и энергетическая эффективность зданий и сооружений. Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2016. 54 с.
16. Бодров, В.И., Бодров, М.В., Бодрова, В.Ф., Кузин, В.Ю. Строительная теплофизика. Нижний Новгород : ННГАСУ, 2015. 156 с. ISBN 978-5-528-00064-0.
17. Бухмиров, В.В., Ракутина, Д.В., Солнышкова, Ю.С. Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен». Иваново : [Б. и.], 2009. 102 с.
18. Леонович, С.Н., Литвиновский, Д.А., Чернякевич, О.Ю., Степанова, А.В. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях. В 2 частях. Часть 1. Минск : БНТУ, 2016. 393 с. ISBN 978-985-550-776-6.
19. Щербань, Е.М., Стельмах, С.А., Ванян, С.С., Евсюков, К.К., Зарецкий, А.В., Коржаева, Е.Э. Особенности изменения прочностных и деформативных характеристик обычного и модифицированного центрифугированных бетонов при циклическом замораживании и оттаивании // *Вестник Евразийской науки*. 2019. № 6. URL: <https://esj-to-day/PDF/62SAVN619.pdf> (дата обращения: 20.11.2025).

REFERENCES

1. Mustafin, N.S., Baryshnikov, A.A. The Latest Technologies in Construction. 3D printer. *Regional'noe razvitie*. 2015; (8): 13. EDN: VLJYDB (In Russian)
2. Simakova, E.A., Selyakova, K.I., Kravchenko, D. 3D Printing in Construction. *Inzhenernye issledovaniya*. 2021; 1(1): 3–11. EDN: QZZTUT (In Russian)
3. Inozemtsev, A.S., Korolev, E.V., Zuong Thanh, Kui. Analysis of 3D Printing Techniques in Construction. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(7 (118)): 863–876. DOI: 10.22227/1997 0935.2018.7.863-876 (In Russian)
4. Grakhov, V.P., Mokhnachev, S.A., Borozdov, O.V. Influence of 3D Printing Techniques on Construction Economy. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2014; (11–12): 2673–2676. (In Russian)
5. Labonnote, N., et al. Additive Construction: State-of-the-art, Challenges and Opportunities. *Automation in Construction*, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>
6. Mazur, K.E., Wardal, W.J., Barwicki, J., Tseyko, M. Thermal Insulation of Agricultural Buildings using Different Biomass Materials. *Energies* 2025; 18, 636. <https://doi.org/10.3390/en18030636>
7. Bondarev, B.A., Bayazov, V.A., Korneev, O.O., Vostrikov, I.A., Meshcheryakov, A.A., Korneeva, A.O. Mixtures for 3D Printing. *Vestnik Evraziiskoi nauki*. 2021; 13(3). DOI: 10.15862/29SAVN321. EDN: HCYDCG (In Russian)
8. Tolstova, Yu.I. Fundamentals of Building Thermophysics. Yekaterinburg, 2014. 106 p. ISBN 978-5-7996-1131-6. (In Russian)
9. Bardouh R., Toussaint, E., Amziane, S., Sandrine Marceau. Evaluating the Mechanical Performance of Bio-Based Concrete: The Role of Aggregate Type and Orientation in Compression Cyclic Loading. *Cleaner Engineering and Technology*. 2026; 30: 101–139. DOI: 10.1016/j.clet.2025.101139
10. Barnat-Hunek, D., Smarzewski, P., Brzyski, P. Properties of Hemp–Flax Composites for use in the Building Industry. *Journal of Natural Fibers*. 2017; 14(3): 410–425. <https://doi.org/10.1080/15440478.2016.1212764>

11. Leclerc, W., Moudhaffar, N., Nguyen, D.M., Promis, G., Perré, P., Tran Le, A.D. Determination of the Thermophysical Properties of Hemphshives using a Methodology Combining X-ray Nanotomography and FFT-based Numerical Simulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2025; 251: 127–331 <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127331>
12. Król, A., Janowska-Renkas, E., Klementowski, I., et al. Thermal Insulation Properties of Ecological Hemp Concrete Modified with Fly Ash from the Energy Sector. *Clean Techn Environ-ment Policy*. 2025; 27: 8225–8233, <https://doi.org/10.1007/s10098-025-03225-6>
13. Osman, Gencel, Onur, Güler, Abid, Ustaoglu, Ertugrul, Erdogan, Ahmet, Sari, Gökhan, Hekimoğlu, Yalçın, Boztoprak, Serkan, Subaşı. Characteristics of Cement-Based Thermo-Concretes Containing Capric Acid Impregnated Hemp for Thermal Energy Storage and Sound Iso-lation in Buildings. *Energy*. 2025; 329: 136837, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136837>
14. Nanazashvili, I.H. Building Materials Made of Wood-Cement Composition. 2nd edn. Moscow: Stroyizdat, 1990. 415 p. (In Russian)
15. Pilipenko, N.V. Heat Losses and Energy Efficiency of Buildings. Saint-Petersburg. 2016. 54 p. (In Russian)
16. Bodrov, V.I., Bodrov, M.V., Bodrova, V.F., Kuzin, V.Yu. Construction Thermophysics. Nizhny Novgorod, 2015. 156 p. ISBN 978-5-528-00064-0. (In Russian)
17. Bukhmirov, V.V., Rakutina, D.V., Solnyshkova, Yu.S. Reference Materials for Solving Problems in the Course "Heat and mass transfer". Ivanovo, 2009. 102 p. (in Russian)
18. Leonovich, S.N. (Ed.), Litvinovsky, D.A., Chernyakevich, O.Yu., Stepanova, A.V. Strength, Crack Resistance and Durability of Structural Concrete under Temperature and Corrosion Influences. Minsk, 2016. 393 p. ISBN 978-985-550-776-6 (Part 1). (In Russian)
19. Shcherban, E.M., Stelmakh, S.A., Vanyan, S.S., Evsyukov, K.K., Zaretsky, A.V., Korzhaeva, E.E. Stress-Strain Characteristics of Conventional and Modified Centrifuged Concrete during Cyclic Freezing and Thawing. *Vestnik Evraziiskoi nauki*. 2019; (6). Available: <https://esj.today/PDF/62SAVN619.pdf> (accessed November 20, 2025). (In Russian)

Сведения об авторах

Закревская Любовь Владимировна, канд. техн. наук, доцент, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 600000, г. Владимир ул. Горького, 87, lvzak@mail.ru

Репина Елизавета Анатольевна, инженер-исследователь, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 600000, г. Владимир ул. Горького, 87, elizavetarepina64@gmail.com

Authors Details

Lyubov V. Zakrevskaya, PhD, A/Professor, Vladimir State University, 87, Gorky Ave., 600000, Vladimir, Russia, lvzak@mail.ru

Elizaveta A. Repina, Research Engineer, Vladimir State University, 87, Gorky Ave., 600000, Vladimir, Russia, elizavetarepina64@gmail.com

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.