Обоснование выбора биопозитивных материалов для несущих и ограждающих конструкций в жилищном строительстве

Марунченко Артём Максимович
аспирант, Юго-Западный государственный университет

Поставлена задача обоснованного выбора биопозитивных материалов для несущих и ограждающих конструкций жилых зданий. Показано, что прямое ранжирование кандидатов по сумме взвешенных показателей приводит к ошибке, так как часть критериев носит отсекающий, а не ранжирующий характер. Предложена процедура, в которой кандидаты сначала отсеиваются по нормативной обеспеченности, требованиям пожарной безопасности и допустимому влажностному режиму, а затем ранжируются по прочностным, теплотехническим и технологическим показателям. Процедура применена к материалам для несущих и ограждающих конструкций. Установлено, что для несущего остова многоэтажного жилого здания отбор проходит только перекрёстно клеёная древесина, обеспеченная сводом правил и национальными стандартами, а для наружных ограждающих конструкций предпочтителен известково-конопляный композит. Прессованная солома и мицелиевые композиты отнесены к резерву.

Ключевые слова: выбор материалов, биопозитивные материалы, несущие конструкции, ограждающие конструкции, перекрёстно клеёная древесина, известково-конопляный композит, критерии выбора, жилые здания.

Введение

Переход к ресурсосберегающим конструктивным системам ставит перед проектировщиком задачу, которая в традиционном строительстве решалась по инерции. Номенклатура биопозитивных материалов широка и включает древесину разной степени переработки, композиты на древесном и однолетнем растительном заполнителе, прессованную солому и выращиваемые мицелиевые композиты. Материалы этой группы различаются между собой сильнее, чем железобетон отличается от кирпичной кладки, при этом различаются не только прочностью и теплопроводностью, но и стадией технологической готовности, и степенью нормативной обеспеченности. Прямой перенос привычных приёмов сравнения на такую разнородную выборку даёт результат, который не выдерживает проверки на стадии прохождения экспертизы.

Цель работы состоит в обосновании выбора биопозитивных материалов для несущих и ограждающих конструкций жилого здания и в построении процедуры такого выбора, учитывающей неоднородность критериев.

Структура критериев и порядок их применения

Систематический обзор работ по многокритериальному выбору строительных материалов показывает, что основным инструментом остаётся метод анализа иерархий, применяемый для формирования перечня критериев и назначения весов [1]. Также существует работа, посвящённая соединению оценки жизненного цикла с многокритериальным выбором, систематизировала 26 критериев для строительных элементов и сгруппировала их по эмиссиям, энергии, ресурсам и цикличности, при этом наиболее весомым по совокупности литературы, систем сертификации и нормативных требований признан потенциал глобального потепления [2]. Оба обзора исходят из того, что критерии соизмеримы и допускают свёртку в единый показатель.

Для биопозитивных материалов это допущение нарушается, так как часть требований к конструкции не смягчается высокими значениями по другим показателям, а просто исключает материал из рассмотрения. Материал, для которого в действующих документах отсутствуют расчётные характеристики, не становится приемлемым от того, что его теплопроводность вдвое ниже, чем у конкурента. Такие требования целесообразно называть отсекающими, в отличие от ранжирующих, по которым сравнение действительно осмысленно.

Исходя из этого критерии выбора выделены ряд групп, так, первая группа объединяет прочностные и деформационные показатели, вторая группа объединяет теплотехнические показатели, третья группа относится к влажностному режиму и биостойкости, четвёртая группа относится к поведению при пожаре, пятая группа относится к нормативной обеспеченности и технологической готовности. Отсекающими выступают пятая группа целиком, а также те требования третьей и четвёртой групп, которые заданы обязательными документами. Ранжирование ведётся по первым двум группам и по той части третьей и четвёртой групп, где нормы допускают вариацию. Порядок применения критериев при этом важнее их весов, поскольку отсев меняет состав выборки и перестраивает систему сравнения.

Материалы для несущих конструкций

Цельная древесина хвойных пород остаётся базовым конструкционным материалом группы. Для сосны, ели и лиственницы свод правил по деревянным конструкциям устанавливает расчётные сопротивления изгибу и сжатию вдоль волокон, при этом для первого сорта они приняты равными 21 МПа, 19,5 МПа, и 13 МПа соответственно [3]. Ограничивает применение не прочность, а сортамент. Сечения и длины цельных элементов заданы условиями лесопиления, из-за чего перекрываемые пролёты сужаются, а несущие стены многоэтажного здания оказываются практически исключены.

Ограничение по сортаменту снимает клеёная древесина. Изготовление несущих клеёных конструкций регламентирует стандарт, где заданы требования к материалам, склеиванию и контролю качества [4]. Предел по пролётам и сечениям задаёт технология предприятия, а не размеры бревна, при этом клеёный брус работает как линейный элемент каркаса и плоскость перекрытия сам по себе не образует.

Перекрёстно клеёная древесина решает и эту задачу. Изменение № 3 к своду правил ввело перекрёстно клеёную древесину в расчётную практику [3], а требования к плитам как к изделию установлены национальными стандартами. Первый стандарт распространяется на клеёные плиты из пиломатериалов с перекрёстным расположением слоёв [5], второй стандарт распространяется на плиты перекрытий и покрытий из перекрёстноклеёной древесины заводского изготовления для жилых и общественных зданий, в том числе для районов с сейсмичностью до 9 баллов по шкале MSK-64 [6]. Работоспособность таких плит в составе комбинированных несущих систем подтверждена расчётно-экспериментальными исследованиями [7], а сравнительная оценка жизненного цикла здания из перекрёстно клеёной древесины и его железобетонного аналога дала преимущество первого варианта в 11 из 18 категорий воздействия [8].

Арболит конструкционных классов формально относится к несущим материалам. Стандарт делит арболит на классы по прочности при сжатии от B0,5 до B3,5 и на марки по средней плотности от D300 до D1000 [9], то есть верхняя граница прочности составляет 3,5 МПа. Этого достаточно для стен малоэтажного здания, но на порядок меньше расчётных сопротивлений древесины, поэтому в многоэтажном здании арболит остаётся материалом заполнения. Костробетон и прессованная солома отсеиваются на первом шаге, так как прочность при сжатии известково-конопляного композита не превышает 1,50 МПа [10], а расчётные характеристики обоих материалов в действующих документах отсутствуют.

Отдельного рассмотрения требует пожарный критерий, обязательный для несущих конструкций. Свод правил по обеспечению огнестойкости с изменением, устанавливающим требования к зданиям с деревянными конструкциями, задаёт здесь отсекающие условия [11]. Существенно, что поведение перекрёстно клеёной древесины при пожаре предсказуемо количественно, поскольку скорость обугливания измерена и лежит в диапазоне от 0,36 до 0,79 мм/мин в зависимости от режима нагрева [12]. Это позволяет закладывать в расчёт сечения потерю рабочего слоя, чего для композитов на однолетнем сырье сделать нельзя из-за отсутствия сопоставимых данных. Результаты отбора материалов для несущих конструкций жилых зданий приведены в таблице 1.

Таблица 1
Результаты отбора материалов для несущих конструкций жилых зданий

Материал	ρ_0, кг/м^3	Нормативное обеспечение	Результат отбора
Древесина цельная хвойная	500	СП 64.13330.2017	малоэтажное строительство
Древесина клеёная	500	ГОСТ 20850-2014	элементы каркаса
Древесина перекрёстно клеёная	500	СП 64.13330.2017, ГОСТ Р 56706-2015, ГОСТ Р 70875-2023	отбор пройден
Арболит конструкционный	300–1000	ГОСТ 19222-2019	малоэтажное строительство
Известково-конопляный композит	197–495	отсутствует	отсеян
Солома прессованная в блоках	80–150	отсутствует	отсеян

Составлено по материалам [3; 4; 5; 6; 9; 10]

Материалы для ограждающих конструкций

Для наружных ограждающих конструкций отсекающие требования смещаются в область теплотехники и влажностного режима. Базовое требуемое сопротивление теплопередаче стен жилых зданий изменяется от 1,75 до 5,6 (м^2·°C)/Вт при росте градусо-суток отопительного периода с 1000 до 12000 [13], и его выполнение достигается при любом из рассматриваемых материалов, вопрос лишь в толщине слоя. Ранжирующим критерием здесь становится теплопроводность, отсекающими критериями становятся влажностный режим и поведение при пожаре.

Арболит обладает наиболее полной нормативной обеспеченностью среди композитов группы, а расчётная теплопроводность арболита при плотности 400 кг/м^3 составляет 0,16 Вт/(м·°C) [13]. По теплотехническому критерию арболит уступает остальным кандидатам, что при прочих равных означает соответственно большую толщину стены.

Плотность известково-конопляного композита составляет от 197 до 495 кг/м^3, теплопроводность от 0,067 до 0,134 Вт/(м·К) [10]. Определяющим при выборе оказывается влажностное поведение композита. В испытаниях при разной относительной влажности воздуха микробиологический рост при 75 % не зафиксирован, при 85 и 95 % появлялась плесень, откуда критический уровень попадает в интервал между 75 и 85 % [14]. Ингибитором роста выступает само известковое вяжущее, а незащищённая костра ведёт себя подобно древесине. Сочетание умеренной теплопроводности с высокой паропроницаемостью и способностью связывать углерод подтверждено в обзорной работе [15]. Применение композита допустимо, если влажностный режим проработан проектно и влажность воздуха в толще конструкции удерживается ниже критического интервала.

По теплопроводности выигрывает прессованная солома, у которой этот показатель лежит в диапазоне от 0,038 до 0,065 Вт/(м·К) при плотности блоков от 80 до 150 кг/м^3, при этом эксплуатационная влажность ограничена значением 20 % [16]. Пожарный критерий солому не отсеивает, поскольку испытания оштукатуренных соломенных стен дают классификацию REI 120 при цементной штукатурке толщиной около 13 мм в два слоя [17]. Ограничивают применение соломы отсутствие расчётных характеристик в нормативных документах и высокая чувствительность результата к качеству оштукатуривания, то есть к операции, которую выполняют на площадке, а не на производстве.

Мицелиевые композиты показывают наилучшие теплотехнические значения, плотность от 94 до 135 кг/м^3 при теплопроводности от 0,040 до 0,058 Вт/(м·К) [18], но отсеиваются по критерию технологической готовности, поскольку производятся опытными партиями со значительным разбросом характеристик. Результаты отбора материалов для наружных ограждающих конструкций приведены в таблице 2.

Составлено по материалам [10; 13; 14; 16; 17; 18]

Таблица 2
Результаты отбора материалов для наружных ограждающих конструкций

Материал	ρ_0, кг/м^3	λ, Вт/(м·°C)	Отсекающие ограничения	Результат отбора
Арболит	400	0,16	ограничений не выявлено	допустим, уступает по теплопроводности
Известково-конопляный композит	197–495	0,067–0,134	плесень при влажности воздуха 85 % и выше, критический интервал от 75 до 85 %	отбор пройден при управляемом влажностном режиме
Солома прессованная в блоках	80–150	0,038–0,065	эксплуатационная влажность не выше 20 %, огнестойкость обеспечивается штукатуркой, REI 120	резерв, расчётные характеристики отсутствуют
Мицелиевые композиты	94–135	0,040–0,058	опытные партии, значительный разброс характеристик	резерв по технологической готовности
Плиты минераловатные (база сравнения)	80–125	0,044	не относится к биопозитивным материалам	вне отбора

Выбор и границы его применимости

После отсева состав выборки меняется, и для несущих конструкций многоэтажного жилого здания отбор проходит единственный материал, то есть перекрёстно клеёная древесина, так как только она обеспечена одновременно сводом правил, стандартом на изделие и стандартом на плиты перекрытий [3; 5; 6] и допускает количественный расчёт поведения при пожаре [12]. Клеёный брус остаётся в системе как элемент каркаса, цельная древесина и конструкционный арболит сохраняют область малоэтажного строительства.

Применительно к наружным ограждающим конструкциям выбор ведётся между арболитом, костробетоном и прессованной соломой. У арболита преимущество состоит в нормативной обеспеченности, а недостаток в теплопроводности. Солома, наоборот, выигрывает по теплопроводности и уступает по управляемости качества, так как пожарные характеристики соломенной кладки задаёт штукатурный слой, который наносят на площадке. Промежуточное положение по теплопроводности занимает известково-конопляный композит, но по совокупности влажностного поведения и технологичности он превосходит конкурентов, так как допускает заводское изготовление блоков и ведёт себя предсказуемо при контролируемой влажности [14, 15]. Основным материалом наружного ограждения принимается известково-конопляный композит.

Отдельным вопросом при сочетании этих материалов в одной конструкции становится узел их сопряжения. Паропроницаемость несущего элемента из перекрёстно клеёной древесины и ограждающего слоя из известково-конопляного композита различается, реакция на увлажнение у них тоже разная, поэтому наиболее уязвимым местом системы оказывается граница между ними. К этой зоне, а не к телу стены, в первую очередь и относится требование поддерживать относительную влажность ниже критического интервала [14]. Практический вывод состоит в том, что назначением материалов выбор не завершается и требуется проработать конструкцию узла, в том числе вентилируемый зазор и защиту торцов древесины от капиллярного подсоса.

Приведённые результаты анализа характерны для условий, где несущая система многоэтажная, а влажностный режим конструкции поддаётся проектному управлению. В малоэтажной застройке отсекающий критерий нормативной обеспеченности снижается, так, конструкционный арболит выходит в полноценные конкуренты перекрёстно клеёной древесине по стоимости. Если влажностный режим гарантировать невозможно, предпочтение отдаётся арболиту, у которого чувствительность к влаге ниже за счёт большего объёма минерального вяжущего. В резерве остаются прессованная солома и мицелиевые композиты, при этом ограничение по соломе снимается разработкой расчётных характеристик, а по мицелиевым композитам выходом на серийное производство.

Выводы

По своей роли критерии выбора биопозитивных материалов неоднородны. Как отсекающие условия действуют нормативная обеспеченность, требования пожарной безопасности и допустимый влажностный режим, причём высокие значения прочностных или теплотехнических показателей их не компенсируют. Отсюда следует некорректность свёртки всех критериев в единый показатель для этой группы материалов.

Обоснована процедура, где кандидаты сначала отсеиваются по отсекающим критериям и лишь затем ранжируются по ранжирующим. На результат такой процедуры порядок применения критериев влияет сильнее, чем назначение весов.

Для несущих конструкций многоэтажного жилого здания отбор проходит перекрёстно клеёная древесина как единственный материал группы, обеспеченный сводом правил и национальными стандартами, и допускающий количественный учёт обугливания при расчёте сечений по измеренной скорости от 0,36 до 0,79 мм/мин.

Для наружных ограждающих конструкций предпочтителен известково-конопляный композит с теплопроводностью от 0,067 до 0,134 Вт/(м·К), допустимый при поддержании относительной влажности ниже критического интервала. Прессованная солома и мицелиевые композиты отнесены к резерву.

Литература

1. Bajwa A. U. R., Siriwardana C., Shahzad W., Naeem M. A. Material selection in the construction industry: a systematic literature review on multi-criteria decision making // Environment Systems and Decisions. – 2025. – Vol. 45, № 1. – Art. 1. – DOI: 10.1007/s10669-025-10001-w
2. Theilig K., Lourenço B., Reitberger R., Lang W. Life cycle assessment and multi-criteria decision-making for sustainable building parts: criteria, methods, and application // The International Journal of Life Cycle Assessment. – 2024. – Vol. 29, № 11. – P. 1965–1991. – DOI: 10.1007/s11367-024-02331-9
3. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 (с Изменениями № 1, 2, 3). – URL: https://docs.cntd.ru/document/456082589 (дата обращения: 22.08.2026).
4. ГОСТ 20850-2014. Конструкции деревянные клееные несущие. Общие технические условия. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200115773 (дата обращения: 22.08.2026).
5. ГОСТ Р 56706-2015. Плиты клееные из пиломатериалов с перекрестным расположением слоев. Технические условия. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200127284 (дата обращения: 22.08.2026).
6. ГОСТ Р 70875-2023. Плиты перекрытий из перекрестноклееной древесины для жилых и общественных зданий. Технические условия. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1302614778 (дата обращения: 22.08.2026).
7. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Goremikins V., Vatin N. I., Pakrastins L. Suspension structure with cross-laminated timber deck panels // Инженерно-строительный журнал. – 2018. – № 7 (83). – С. 126–135. – DOI: 10.18720/MCE.83.12
8. Andersen J. H., Rasmussen N. L., Ryberg M. W. Comparative life cycle assessment of cross laminated timber building and concrete building with special focus on biogenic carbon // Energy and Buildings. – 2022. – Vol. 254. – Art. 111604. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111604
9. ГОСТ 19222-2019. Арболит и изделия из него. Общие технические условия. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200165761 (дата обращения: 22.08.2026).
10. Gołębiewski M., Pietruszka B., Piątkiewicz W., Kubiś M., Oleksiienko O. Compressive strength, thermal conductivity, vapor permeability and specific heat of hemp-lime composites varying in density for wall, roof and floor applications // Materials. – 2025. – Vol. 18, № 21. – Art. 4958. – DOI: 10.3390/ma18214958
11. СП 2.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты (с Изменением № 2, утв. приказом МЧС России от 06.11.2025 № 999). – URL: https://docs.cntd.ru/document/565248963 (дата обращения: 22.08.2026).
12. Bartlett A., Hadden R. M., Bisby L. A., Law A. Analysis of cross-laminated timber charring rates upon exposure to nonstandard heating conditions // Fire and Materials 2015. 14th International Conference and Exhibition. Proceedings. – London: Interscience Communications, 2015. – P. 667–681.
13. СП 50.13330.2024. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003: утв. приказом Минстроя России от 15.05.2024 № 327/пр. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1306326592 (дата обращения: 22.08.2026).
14. Johansson S., Balksten K., Strandberg-de Bruijn P. B. Risk for mould growth on hemp-lime at different relative humidity // Construction Technologies and Architecture. – 2022. – Vol. 1. – P. 588–594. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/CTA.1.588
15. Steyn K., de Villiers W., Babafemi A. J. A comprehensive review of hempcrete as a sustainable building material // Innovative Infrastructure Solutions. – 2025. – Vol. 10. – Art. 97. – DOI: 10.1007/s41062-025-01906-1
16. Cascone S., Rapisarda R., Cascone D. Physical properties of straw bales as a construction material: a review // Sustainability. – 2019. – Vol. 11, № 12. – Art. 3388. – DOI: 10.3390/su11123388
17. Džidić S. Fire resistance of the straw bale walls // Contemporary Achievements in Civil Engineering: Proceedings of the 5th International Conference. – Subotica, 2017. – P. 423–432. – DOI: 10.14415/konferencijaGFS2017.044
18. Ashraf U., Hzami A., Alghamri R. Mycelium-based composites: a review of a sustainable alternative for thermal insulation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2026. – Vol. 1587. – Art. 012037. – DOI: 10.1088/1755-1315/1587/1/012037

Rationale for the selection of biopositive materials for load-bearing and enclosing structures in housing construction

Marunchenko A.M.
Southwest State University

JEL classification: L61, L74, R53

The objective is to rationally select biopositive materials for load-bearing and enclosing structures in residential buildings. It is shown that direct ranking of candidates based on the sum of weighted indicators leads to error, as some criteria are of a screening nature rather than a ranking one. A procedure is proposed in which candidates are first screened based on regulatory compliance, fire safety requirements, and permissible humidity conditions, and then ranked based on strength, thermal performance, and technological properties. The procedure is applied to materials for load-bearing and enclosing structures. It has been established that only cross-laminated timber, as defined by a code of practice and national standards, is selected for the load-bearing frame of a multi-story residential building, while lime-hemp composite is preferred for external enclosing structures. Pressed straw and mycelial composites are relegated to reserve materials.

Keywords: material selection, biopositive materials, load-bearing structures, enclosing structures, CLT, lime-hemp composite, selection criteria, residential buildings.

References

1. Bajwa A. U. R., Siriwardana C., Shahzad W., Naeem M. A. Material selection in the construction industry: a systematic literature review on multi-criteria decision making // Environment Systems and Decisions. – 2025. – Vol. 45, No. 1. – Art. 1. – DOI: 10.1007/s10669-025-10001-w
2. Theilig K., Lourenço B., Reitberger R., Lang W. Life cycle assessment and multi-criteria decision-making for sustainable building parts: criteria, methods, and application // The International Journal of Life Cycle Assessment. – 2024. – Vol. 29, No. 11. – P. 1965–1991. – DOI: 10.1007/s11367-024-02331-9
3. SP 64.13330.2017. Timber structures. Updated version of SNiP II-25-80 (with Amendments No. 1, 2, 3). – URL: https://docs.cntd.ru/document/456082589 (accessed: 22.08.2026).
4. GOST 20850-2014. Load-bearing glued timber structures. General specifications. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200115773 (accessed: 22.08.2026).
5. GOST R 56706-2015. Cross-laminated timber panels. Specifications. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200127284 (accessed: 22.08.2026).
6. GOST R 70875-2023. Cross-laminated timber floor/roof panels for residential and public buildings. Technical specifications. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1302614778 (accessed: 22.08.2026).
7. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Goremikins V., Vatin N. I., Pakrastins L. Suspension structure with cross-laminated timber deck panels // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No. 7 (83). – pp. 126–135. – DOI: 10.18720/MCE.83.12
8. Andersen J. H., Rasmussen N. L., Ryberg M. W. Comparative life cycle assessment of cross laminated timber building and concrete building with special focus on biogenic carbon // Energy and Buildings. – 2022. – Vol. 254. – Art. 111604. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111604
9. GOST 19222-2019. Wood-cement concrete (arbolit) and products made from it. General technical specifications. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200165761 (accessed: 22.08.2026). 10. Gołębiewski M., Pietruszka B., Piątkiewicz W., Kubiś M., Oleksiienko O. Compressive strength, thermal conductivity, vapor permeability and specific heat of hemp-lime composites varying in density for wall, roof and floor applications // Materials. – 2025. – Vol. 18, No. 21. – Art. 4958. – DOI: 10.3390/ma18214958
11. SP 2.13130.2020. Fire Protection Systems. Ensuring Fire Resistance of Protected Objects (with Amendment No. 2, approved by the Order of the EMERCOM of Russia dated November 6, 2025, No. 999). – URL: https://docs.cntd.ru/document/565248963 (accessed: August 22, 2026).
12. Bartlett A., Hadden R. M., Bisby L. A., Law A. Analysis of cross-laminated timber charring rates upon exposure to nonstandard heating conditions // Fire and Materials 2015. 14th International Conference and Exhibition. Proceedings. – London: Interscience Communications, 2015. – pp. 667–681.
13. SP 50.13330.2024. Thermal Protection of Buildings. Updated version of SNiP 23-02-2003: approved by the Order of the Ministry of Construction of Russia dated May 15, 2024, No. 327/pr. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1306326592 (accessed: August 22, 2026). 14. Johansson S., Balksten K., Strandberg-de Bruijn P. B. Risk for mold growth on hemp-lime at different relative humidity // Construction Technologies and Architecture. – 2022. – Vol. 1. – P. 588–594. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/CTA.1.588
15. Steyn K., de Villiers W., Babafemi A. J. A comprehensive review of hempcrete as a sustainable building material // Innovative Infrastructure Solutions. – 2025. – Vol. 10. – Art. 97. – DOI: 10.1007/s41062-025-01906-1
16. Cascone S., Rapisarda R., Cascone D. Physical properties of straw bales as a construction material: a review // Sustainability. – 2019. – Vol. 11, No. 12. – Art. 3388. – DOI: 10.3390/su11123388
17. Džidić S. Fire resistance of the straw bale walls // Contemporary Achievements in Civil Engineering: Proceedings of the 5th International Conference. – Subotica, 2017. – P. 423–432. – DOI: 10.14415/konferencijaGFS2017.044
18. Ashraf U., Hzami A., Alghamri R. Mycelium-based composites: a re-view of a sustainable alternative for thermal insulation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2026. – Vol. 1587. – Art. 012037. – DOI: 10.1088/1755-1315/1587/1/012037