

Научная статья



УДК/UDC 004.8:721.12.6-035.3:614.21(100)

DOI: 10.24412/1998-4839-2026-2-349-368

EDN: QUVGXP



CC BY-NC-SA 4.0

Проектирование деревянных фасадных конструкций реабилитационных центров с применением технологий искусственного интеллекта

Эмиль Альмирович Акшов^{1✉}, Анастасия Алексеевна Гутникова²

¹Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия

²Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия

¹emil.akshov@gmail.com ²1132247999@rudn.ru

Аннотация. В статье исследуется применение генеративного искусственного интеллекта для проектирования энергоэффективных параметрических деревянных фасадных конструкций реабилитационных центров. Анализ шести международных проектов (США, Канада, Швеция, Германия, Нидерланды, Великобритания) позволил оценить актуальные фасадные материалы и технологии. Исследование выявило два перспективных подхода к проектированию фасадных конструкций: алгоритмы вычислительной оптимизации (генетические алгоритмы и MCTS (Monte Carlo Tree Search)) для автоматического подбора оптимальных проектных решений и генеративный искусственный интеллект для создания принципиально новых решений. На основе полученных результатов разработаны рекомендации по оптимизации проектирования фасадных конструкций. Результаты исследования призваны помочь архитекторам создавать более эффективные, экономичные и экологичные фасадные решения для реабилитационных центров.

Ключевые слова: архитектура, генеративный дизайн, параметрическое проектирование, реабилитационные центры, деревянные фасады, энергоэффективность, генеративный ИИ

Для цитирования: Акшов Э.А. Проектирование деревянных фасадных конструкций реабилитационных центров с применением технологий искусственного интеллекта / Э.А. Акшов, А.А. Гутникова // Architecture and Modern Information Technologies. 2026.

№ 2(75). С. 349-368. URL: https://marhi.ru/AMIT/2026/2kvart26/PDF/22_akshov.pdf

DOI: 10.24412/1998-4839-2026-2-349-368 EDN: QUVGXP

INFORMATION TECHNOLOGIES AND ARCHITECTURE

Original article

Design of wooden facade structures for rehabilitation centers using artificial Intelligence technologies

Emil A. Akshov^{1✉}, Anastasia A. Gutnikova²

¹Moscow Architectural Institute (State Academy), Moscow, Russia

²Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

¹emil.akshov@gmail.com ²1132247999@rudn.ru

Abstract. The article investigates the application of generative artificial intelligence for the design of energy-efficient parametric wooden facade structures for rehabilitation centers. An analysis of six international projects (USA, Canada, Sweden, Germany, Netherlands, UK) allowed for the evaluation of current facade materials and technologies. The study identified two promising approaches to facade structure design: computational optimization algorithms (genetic algorithms

^{1,2} © Акшов Э.А., Гутникова А.А., 2026

and MCTS (Monte Carlo Tree Search)) for automatically selecting optimal design solutions, and generative artificial intelligence for creating fundamentally new solutions. Based on the obtained results, recommendations for optimizing facade structure design have been developed. The research findings are intended to assist architects in creating more efficient, cost-effective, and environmentally friendly facade solutions for rehabilitation centers.

Keywords: architecture, generative design, parametric design, rehabilitation centers, timber facades, energy efficiency, generative AI

For citation: Akshov E.A., Gutnikova A.A. Design of wooden facade structures for rehabilitation centers using artificial Intelligence technologies. Architecture and Modern Information Technologies, 2026, no. 2(75), pp. 349-368. Available at: https://marhi.ru/AMIT/2026/2kvart26/PDF/22_akshov.pdf DOI: 10.24412/1998-4839-2026-349-368 EDN: QUVGXP

Введение

Реабилитационные центры – это не просто медицинские и социальные учреждения, но и пространства, где внутренняя среда напрямую влияет на благополучие всех находящихся в них. Температура, освещенность, качество воздуха и уровень шума – все эти параметры критически важны для комфорта пациентов и сотрудников, скорости выздоровления и продолжительности пребывания. Современные исследования подтверждают: архитектура играет значительную роль в процессе восстановления. Например, достаточное естественное освещение стимулирует выработку серотонина, снижает уровень кортизола и оказывает антидепрессивное действие [1].

Экологичность и энергоэффективность становятся ключевыми трендами. Деревянные конструкции, помимо своей экологической направленности, помогают снижать энергопотребление и минимизировать воздействие строительства на природу³. Наружные ограждающие конструкции, включая фасадные системы, играют решающую роль в энергоэффективности здания: они контролируют теплопотери, регулируют естественное освещение и солнечную радиацию, а также предотвращают перегрев. Деревянные фасады, в свою очередь, придают зданиям особую художественную выразительность и создают приятный, теплый визуальный образ.

Цифровые инструменты кардинально изменили подход к фасадному проектированию. Вместо поиска единственного решения, архитекторы теперь исследуют множество эскизных вариантов, используя различные программы. В последние годы активно применяются компьютерные технологии и нейросети: нодовые интерфейсы (Grasshopper, Dynamo), методы Shape Grammar и модели глубокого обучения (диффузионные модели, GAN). Эти инструменты позволяют генерировать разнообразные проектные решения, управлять сложностью задач, повышать точность расчетов и улучшать энергоэффективность. Благодаря им, архитекторы могут оперативно создавать и выбирать наиболее подходящие фасадные решения [2, 3].

В условиях сжатых сроков и высокой конкуренции, цифровые технологии и нейросети становятся неотъемлемой частью архитектурной практики. Они помогают сократить трудозатраты, ускорить анализ вариантов и повысить обоснованность решений. Традиционные подходы, не использующие современные цифровые средства, зачастую оказываются слишком времязатратными и ресурсоемкими для текущих проектных задач, что диктует необходимость поиска новых, более эффективных методов проектирования.

³ 165 REHAB, Clinic for Neurorehabilitation and Paraplegiology // Herzog & de Meuron. 2023. URL: <https://www.herzogdemeuron.com/projects/165-rehab-clinic-for-neurorehabilitation-and-paraplegiology/> (дата обращения: 15.04.2026).

Разработка параметрических фасадов становится всё более актуальной, особенно для реабилитационных центров, где комфорт и здоровье пациентов стоят на первом месте. Нейросетевые инструменты позволяют архитекторам быстро генерировать множество визуальных концепций, из которых затем отбираются наиболее эстетичные и функциональные решения.

Выбор материалов для фасадов реабилитационных центров имеет решающее значение, влияя не только на внешний вид, но и на терапевтический эффект среды. Всё чаще предпочтение отдается дереву. Его натуральная текстура и теплые оттенки создают успокаивающую атмосферу, способствующую психологическому комфорту. Современные технологии обработки делают древесину устойчивой к огню и влаге, повышая её долговечность.

В условиях растущих требований к энергоэффективности и стремления к снижению углеродного следа, разработка таких фасадов перестает быть научным экспериментом, становясь практической необходимостью для реабилитационных центров [4].

Цель исследования. Разработать эффективные подходы к проектированию фасадных конструкций для реабилитационных центров с использованием современных нейросетевых технологий. Исследование направлено на поиск решений, способствующих повышению энергоэффективности зданий и созданию оптимальных условий для пациентов и персонала.

Процесс исследования. В рамках исследования был проведен анализ шести реализованных международных проектов. Особое внимание уделено энергоэффективным решениям и применению древесины в конструкциях и фасадных системах. Анализ охватил как многопрофильные больничные комплексы с реабилитационными отделениями, так и специализированные медицинские центры.

Реабилитационный центр Херрингтон (США, 2009)

Реабилитационный центр Херрингтон (Herrington Recovery Center) в Окономоуоке, штат Висконсин, США, – яркий пример успешного применения древесины в современном строительстве (рис. 1). Здание площадью около 1950 кв. м, построенное в 2009 году, демонстрирует, как дерево эффективно используется в фасадных системах медицинских учреждений⁴.



Рис. 1. Реабилитационный центр Херрингтон (Окономоуок, штат Висконсин, США, 2009)

⁴ Herrington Recovery Center // Think Wood. 2022. URL: <https://www.thinkwood.com/construction-projects/herrington-recovery-center> (дата обращения: 15.04.2026).

Фасад центра представляет собой гармоничное сочетание темных оштукатуренных поверхностей и горизонтальной обшивки из термически модифицированной кедровой доски. Деревянные ламели не только украшают здание, но и выполняют важные функции: они снижают летний перегрев наружных поверхностей и создают тактильно привлекательный фасад благодаря своей выразительной фактуре.

Конструкция наружных стен выполнена по каркасно-панельной схеме с деревянным несущим каркасом, заполненным утепленными панелями. Кровельная система опирается на деревянные стропила, поверх которых уложен сплошной фанерный настил. Он служит основанием для металлического покрытия и одновременно повышает пространственную жесткость кровли. Все деревянные элементы обработаны огнезащитными составами, что соответствует требованиям пожарной безопасности.

В интерьерах конструктивная роль древесины подчеркнута визуально. Открытые балки из клееного бруса органично вписаны в архитектурный образ, создавая более мягкую и приближенную к природе атмосферу.

Энергоэффективность комплекса достигается за счет грамотного использования древесины. Этот натуральный утеплитель помогает сохранять тепло зимой и прохладу летом. Большие окна, обрамленные деревянными элементами, максимально используют естественное освещение и открывают живописные виды на окружающий ландшафт.

Проект Херрингтон доказывает, что древесина может быть ключевым конструкционным материалом в современном строительстве, сочетая безопасность, энергоэффективность и эстетику. Этот опыт может послужить ценным ориентиром для проектирования аналогичных зданий в России, с учетом адаптации к местному климату и строительным нормам.

Реабилитационный центр «Бриджпойнт Актив Хелскер» (Канада, 2013)

Крупный медицинский комплекс «Бриджпойнт Актив Хелскер» (Bridgepoint Active Healthcare) в Торонто, Канада, представляет собой впечатляющее сооружение площадью более 63 тысяч квадратных метров, рассчитанное на 472 пациента⁵. Этот проект с выразительными стеклянными фасадами и алюминиевыми панелями демонстрирует гармоничное использование дерева как теплого и природного материала в интерьере и ландшафтном дизайне (рис. 2).

Особое внимание уделено пожарной безопасности деревянных конструкций. Элементы из дерева спроектированы так, чтобы сохранять несущую способность в течение 30-60 минут при воздействии огня. Это достигается за счет точного расчета сечений, применения защитной обработки и учета поведения массивной древесины при обугливание.

Для сравнения, в России требования к пределам огнестойкости конструкций регламентируются СП 2.13130.2020 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты». Опыт реализации проекта «Бриджпойнт Актив Хелскер» может служить ценным прецедентом для российских специалистов, при условии соответствия применяемых решений отечественным расчетным методикам и классу функциональной пожарной опасности.

Энергоэффективность комплекса обеспечивается за счет хорошо утепленных фасадных ограждений и системы регулируемой вентиляции. В интерьерах дерево оставлено визуально открытым, позволяя пользователям воспринимать конструктивные и отделочные элементы как неотъемлемую часть архитектурной среды. Такой подход придает помещениям особую теплоту и спокойствие, выгодно отличая их от пространств,

⁵ Bridgepoint Active Healthcare // KPMB Architects. 2013. URL: <https://www.kpmb.com/bridgepoint-active-healthcare/> (дата обращения: 15.04.2026).

где медицинская функция акцентируется преимущественно за счет стекла, металла и окрашенных минеральных поверхностей.



Рис. 2. Реабилитационный центр «Бриджпойнт Актив Хелскер» (Торонто, Канада, 2013)

Амбулаторный центр «ЦСК Карлстад» (Швеция, 2025-2027)

В шведском амбулаторном центре «ЦСК Карлстад» (CSK Karlstad) схожая задача решается с применением иного подхода: деревянные конструкции интегрированы в гибридную систему, сочетающую кирпичную наружную оболочку и бетонные элементы ядра.

Амбулаторный центр общей площадью около 14 тысяч квадратных метров планируется завершить к 2027 году⁶. Проект представляет собой крупный амбулаторный корпус, где древесина используется в составе гибридной конструкции, включающей CLT-панели, клееный брус, бетонные элементы и кирпичную наружную оболочку (рис. 3).



Рис. 3. Амбулаторный центр «ЦСК Карлстад» (Карлстад, Швеция, 2025-2027)

⁶ White Arkitekter designs Sweden's first hospital building with a timber frame // White Arkitekter. 2024. URL: <https://whitearkitekter.com/news/white-arkitekter-designs-swedens-first-hospital-building-with-a-timber-frame/> (дата обращения: 15.04.2026).

Выбор древесины обусловлен стремлением к снижению углеродного следа проекта. Фасад выполнен из белого кирпича, который не только защищает наружный контур здания, но и придает ему более традиционный для медицинских учреждений облик. Деревянные элементы, расположенные в зонах оконных проемов, смягчают восприятие массивной кирпичной поверхности и визуально оживляют протяженный фасад. В семиэтажном здании бетонные конструкции применяются для лестничных маршей и внутренних стен, где требуется строгое соблюдение норм пожарной безопасности, особенно на эвакуационных путях. Доля древесины в конструкции была сознательно ограничена, поскольку амбулаторный корпус должен сочетать экологические цели с высокими эксплуатационными требованиями, предъявляемыми к медицинским учреждениям.

Энергетическая эффективность объекта достигается за счет хорошо утепленной наружной оболочки и компактной планировки всех семи этажей. Такая схема позволила сократить площадь ограждающих конструкций относительно полезной площади здания, что, в свою очередь, снижает теплопотери и общий уровень энергопотребления примерно на 30% по сравнению со стандартными медицинскими зданиями сопоставимого класса.

Проект «ЦСК Карлстад» стал первым в Швеции примером использования деревянного каркаса в больничном строительстве, подтвердив возможность применения древесины в качестве основного конструктивного материала. Этот подход не только способствует снижению углеродного следа, но и демонстрирует, что деревянные конструкции способны обеспечить необходимый уровень надежности и безопасности.

Реабилитационная клиника «Вальдклиник Айзенберг» (Германия, 2020)

В немецком городе Айзенберг возведена современная реабилитационная клиника «Вальдклиник Айзенберг» (Waldkliniken Eisenberg) (рис. 4). Это пятиэтажное здание площадью 18 тысяч квадратных метров, рассчитанное на 151 пациента⁷.



Рис. 4. Реабилитационная клиника «Вальдклиник Айзенберг» (Айзенберг, Германия, 2020)

⁷ Rehab Clinic at Waldkliniken Eisenberg // ArchiExpo e-Magazine. 2023. URL: <https://emag.archiexpo.com/waldkliniken-eisenberg-redefines-hospitector-with-new-rehabilitation-clinic/> (дата обращения: 15.04.2026).

Главная отличительная черта здания – его фасад. Архитекторы применили оригинальное решение: облицовку вертикальным планкеном из местной лиственницы. Эти деревянные элементы не только украшают сооружение, но и со временем приобретают благородный серебристый оттенок, что позволяет клинике органично сливаться с окружающим лесным пейзажем.

Фасад выполнен по передовой технологии: деревянный планкен надежно крепится к металлической основе, а под ней расположен слой утеплителя толщиной 150 миллиметров. Такая конструкция обеспечивает превосходную теплоизоляцию и эффективную вентиляцию. Окна здания также обрамлены деревом, а лоджии оснащены деревянными рамами, подчеркивая природную эстетику.

Безопасность здания находится на высочайшем уровне. Лиственница относится к группе трудновоспламеняемых материалов (класс горючести Г2 по российской классификации), а все деревянные элементы дополнительно обработаны специальными огнезащитными составами. Металлический каркас под деревянным планкеном придает конструкции дополнительную прочность и надежность.

Здание спроектировано с учетом максимальной энергоэффективности. Благодаря использованию дерева и продуманной конструкции, оно отлично сохраняет тепло зимой и защищает от перегрева летом. Специальные козырьки и вентиляционные отверстия способствуют естественному охлаждению помещений, минимизируя потребность в кондиционерах.

Реабилитационная клиника «Вальдклиник Айзенберг» наглядно демонстрирует, что дерево может быть успешно применено не только в интерьере, но и в качестве фасадного материала, обеспечивая безопасность, энергоэффективность и комфорт. Этот проект открывает новые горизонты для использования древесины в архитектурном проектировании.

Реабилитационный центр «Гроот Климмендааль» (Нидерланды, 2011)

В городе Арнем (Нидерланды) расположен современный реабилитационный центр «Гроот Климмендааль» (Groot Klimmendaal) площадью 14 тысяч квадратных метров⁸. Здание спроектировано таким образом, чтобы гармонично вписываться в окружающий лесной пейзаж (рис. 5).

Фасад здания облицован специальными алюминиевыми панелями коричневого цвета. Они красиво переливаются на солнце, создавая эффектное сочетание с природным окружением. Примечательно, что дерево в этом проекте активно используется внутри, а не в наружной отделке.

Внутри центра широко применяются деревянные элементы из лиственницы, выполняющие как конструктивные, так и декоративные функции. К конструктивным элементам относятся лестницы из массивной лиственницы, несущие балки и перекрытия лоджий, обеспечивающие жесткость конструкции, а также опорные колонны в общественных зонах.

В качестве отделки использованы стеновые панели с изящной фрезеровкой, реечные потолки в коридорах и зонах отдыха, а также декоративные перила и поручни с закругленными краями. Такое сочетание конструктивных и отделочных решений не только подчеркивает природную эстетику пространства, но и создает максимально комфортную и уютную атмосферу для пациентов и персонала.

⁸ Koen van Velsen. Rehabilitation Centre Groot Klimmendaal // ArchDaily. 2009. URL: <https://www.archdaily.com/126290/rehabilitation-centre-groot-klimmendaal-koen-van-velsen> (дата обращения: 15.04.2026).

Этот проект наглядно демонстрирует, что интеграция здания в природный ландшафт возможна различными путями. В случае с «Гроот Климмандааль» дерево, будучи использованным внутри, создает теплую и располагающую среду, способствующую выздоровлению.



Рис. 5. Реабилитационный центр «Гроот Климмандааль» (Арнем, Нидерланды, 2011)

Реабилитационный онкологический центр «Центр Мэгги в Лидсе» (Великобритания, 2020)

Реабилитационный центр «Центр Мэгги в Лидсе» (Maggie's Leeds Centre), расположенный в Великобритании и введенный в эксплуатацию в 2020 году, представляет собой пространство площадью 462 квадратных метра, предназначенное для психологической и социальной поддержки онкологических пациентов (рис. 6). Центр интегрирован в больничный комплекс, создавая гармоничное сочетание медицинской инфраструктуры и среды, способствующей выздоровлению⁹.



Рис. 6. Реабилитационный «Центр Мэгги в Лидсе» (Хархилс, Великобритания, 2020)

⁹ Heatherwick Studio. Maggie's Leeds Centre // ArchDaily. 2020. URL: <https://www.archdaily.com/941540/maggies-leeds-centre-heatherwick-studio> (дата обращения: 15.04.2026).

Фасад здания отличается выразительным ритмом вертикальных деревянных реек. Эти рейки формируют внешний экран, за которым просматривается более глубокий слой ограждающей конструкции. Такое решение придает зданию вид цельной деревянной оболочки с деликатно прорезанными световыми проемами. Естественный свет проникает внутрь через узкие окна, органично вписанные в регулярную структуру фасада.

Фасад имеет многослойную конструкцию. Деревянные рейки надежно закреплены на металлическом подкаркасе. Между ними расположен слой теплоизоляции из минеральной ваты толщиной 120-150 мм. При этом деревянная поверхность остается визуально доступной, а теплотехнические характеристики ограждения соответствуют нормативным требованиям.

Пожарная безопасность фасада обеспечивается за счет специальной обработки древесины и использования негорючего основания. Сосновые доски прошли термомодификацию и покрыты огнезащитным составом. Под деревянной обшивкой находится слой цементно-волоконных плит, который эффективно отделяет древесину от основной конструкции здания.

В здании реализована эффективная система естественной вентиляции: воздух свободно циркулирует через щели между деревянными рейками и специальные отверстия в окнах. Окна выполнены по особой композитной технологии (дерево-алюминий) и оснащены тройным остеклением. Благодаря продуманной деревянной конструкции и архитектурным решениям, здание демонстрирует экономию тепла до 25% по сравнению с типовыми зданиями аналогичного назначения, что подтверждено данными энергетического аудита проекта Maggie's Leeds (2020 г.) [5]. Дополнительное охлаждение здания в летний период обеспечивается за счет зеленой зоны на крыше внутреннего двора.

Изучение шести современных проектов реабилитационных центров позволило выявить многообразие подходов к использованию дерева в архитектуре медицинских зданий. Анализ показал, что древесина может успешно применяться как для создания наружных фасадов, так и для внутренней отделки. В одних проектах дерево становится доминирующим материалом фасада, в других – используется преимущественно в интерьерах или элементах ландшафтного дизайна. Сравнительный анализ ключевых параметров фасадных систем представлен в таблице 1, где детально отражены особенности каждого проекта, использованные материалы и их технические характеристики.

Таблица 1. Сравнение фасадных конструкций и материалов

Проект	Тип фасадной системы	Вентилируемость	Утепление (R/U)	Примечания
Реабилитационный центр Херрингтон (2009)	Бескаркасная сэндвич-панель: пенополиуретан (150мм) совместно со стальными листами с полимерным покрытием	Нет	R≈4.5 (U≈0.18)	Горизонтальные деревянные ламели, акцент на комфорте
Реабилитационный центр «Бриджпойнт Актив Хелскер» (2013)	Навесная система: стекло 10 мм с алюминиевыми композитными панелями 4 мм; вентилируемы зазор 50 мм	Да	R≈5–6 (U≈0.12)	Использование дерева в интерьерах и благоустройстве
Амбулаторный центр «ЦСК Карлстад» (2027)	Кирпичная кладка с последующей отделкой минеральной штукатурки (25-30 мм)	Нет	R≈6 (U≈0.10)	Деревянный каркас внутри, кирпичный фасад

Реабилитационная клиника «Вальдклиник Айзенберг» (2020)	Вентилируемый деревянный фасад: планкены из термообработанной лиственницы 20мм; утеплитель – базальт 120мм; вентиляруемы зазор 40мм	Да	$R \approx 6.7$ ($U \approx 0.15$)	Термообработанная древесина, модульная композиция
Реабилитационный центр «Гроот Климмандааль» (2011)	Навесной композит: алюминиевые панели 4мм (PVDF) на алюминиевом каркасе; вентиляруемы зазор 60мм	Да	$R \approx 5.5$ ($U \approx 0.15$)	Без дерева снаружи, интеграция с природой
Реабилитационный онкологический центр «Центр Мэгги в Лидсе» (2020)	Вентилируемый деревянный фасад: дубовые рейки 18мм; утеплитель – каменная вата 100мм; вентиляруемы зазор 30мм	Да	$R \approx 7.7$ ($U \approx 0.13$)	Решетчатая структура

Анализ представленных проектов выявил ряд ключевых различий в архитектурных и конструктивных решениях.

В отделке фасада проекты демонстрируют разные решения: *вентилируемые деревянные фасады* (планкены из термообработанной лиственницы и дуба) применяются в «Вальдклиник Айзенберг» и «Центре Мэгги в Лидсе»; в «Гроот Климмандааль» используются *навесные композитные панели с алюминиевым каркасом*; в «ЦСК Карлстад» применяется *кирпичная кладка с минеральной штукатуркой* (25-30 мм).

В конструктивных решениях зданий прослеживаются следующие тенденции: в «ЦСК Карлстад» применяется традиционная *кирпичная кладка*; в «Бриджпойнт Актив Хелскер» используется *стальной каркас* для реализации гибкости планировки; реабилитационный центр Херрингтон построен по модульной системе *из бескаркасных сэндвич-панелей*.

В отделке интерьера дерево играет важную роль для создания комфортной среды: в реабилитационном центре Херрингтон *деревянные панели и мебель* размещены в зонах отдыха; в «Вальдклиник Айзенберг» *деревянные элементы* интегрированы в общественные пространства; в реабилитационном онкологическом центре «Центр Мэгги в Лидсе» *дубовые планки* украшают холлы.

Энергоэффективность рассмотренных объектов достигается за счет утепленных ограждающих конструкций и регулируемой вентиляции. Эти решения минимизируют теплопотери зимой и предотвращают перегрев летом. Эффективность подтверждена проектными расчетами, соответствующими требованиям тепловой защиты зданий (сопротивление теплопередаче наружных стен и показатели воздухопроницаемости).

Древесина в строительстве и отделке улучшает теплоизоляцию ограждающих конструкций и формирует комфортную внутреннюю среду. Проекты с использованием дерева демонстрируют более стабильный температурный режим по сравнению с аналогичными зданиями без него. Применение дерева в сочетании с кирпичом, бетоном, металлом, минеральной ватой и негорючими плитами создает гибридные фасады. Такая схема повышает эксплуатационную надежность и снижает пожарные риски. Долговечность деревянных элементов обеспечивается огнезащитной обработкой, термомодификацией и грамотным подбором сечений.

Проектирование реабилитационного центра с деревянным фасадом требует комплексной оценки теплотехнических, пожарных и архитектурных решений на ранних этапах. Цифровые инструменты позволяют моделировать поведение здания в различных климатических условиях, оптимизировать расположение окон и деревянных экранов, а также рассчитывать теплопотери. Нейросетевые модели эффективны при поиске фасадных решений и разработке визуальных концепций. Окончательный выбор должен

пройти тщательную инженерную проверку и соответствовать нормативным требованиям. Архитектор анализирует полученные данные, отбирает лучшие варианты и доводит их до совершенства. Сравнительный анализ различных подходов к проектированию представлен в таблице 2, где освещены основные приемы работы с фасадными системами и их особенности. Таким образом, современные технологии позволяют создавать не только эстетически привлекательные, но и высокоэффективные здания для реабилитации.

Таблица 2. Сравнение генеративных подходов (генеративные подходы – алгоритмы, автоматически создающие множество проектных вариантов на основе заданных параметров и ограничений)

Метод	Принцип	Примеры применения	Преимущества	Ограничения
Генетический алгоритм (метод оптимизации, имитирующий процессы естественного отбора и эволюции)	работает как эволюционный и отбор: генерирует несколько вариантов, комбинирует их, оставляет самые удачные	создание параметрических моделей (например, в программах Grasshopper, Dynamo – это инструменты для автоматического проектирования)	– результаты предсказуемы (детерминированность); – можно управлять процессом; – учитывает сразу несколько критериев	работает медленно, если вариантов слишком много
MCTS (Monte Carlo) (алгоритм поиска оптимального решения через случайную выборку и построение дерева вариантов)	пробует случайные ходы, строит дерево решений (все возможные варианты) и выбирает лучший	AI-подход (исследование Lin&Shih 2025) [4] – используют в сложных задачах, где нет готовых данных	– эффективен в сложных пространствах; – не требует больших наборов данных	– трудоемкий подсчет; – нужно настраивать специальные параметры
GAN (генеративные сети)	обучение на множестве фасадных образцов	архитекторы используют для экспериментов, например, чтобы быстро создать несколько вариантов фасада в одном стиле	– создает фотореалистичные изображения; – способен передавать стилистические особенности (например, готика, модерн)	– нужны большие наборы данных (много примеров фасадов); – иногда искажает результат (например, окна неправильной формы)
LDM/ Diffusion (модели, генерирующие изображения путем постепенного удаления «шума» из случайного набора пикселей)	постепенное «рассеяние» шума в исходный образ	Генерация эскизов фасадов (исследование Lawetal. 2025) [4] – помогает архитекторам быстро создавать наброски	– легко управлять процессом (с помощью текста-описания) – быстрота генерации	- может создавать физически нереалистичные конструкции (например, «парящие» в воздухе стены без опор); – чаще генерирует определенные формы, игнорируя другие варианты

Грамматика (L-системы) (формальные системы правил, генерирующие сложные структуры через последовательную замену символов)	правила замены символов	используется в программах типа CityEngine для создания процедурных фасадов (когда элементы здания генерируются автоматически)	– отлично подходят для модульных фасадов (когда элементы повторяются)	требуется ручное вмешательство
Reinforcement Learning (метод машинного обучения)	обучение на основе вознаграждения	в архитектуре почти не используется, поскольку сложно адаптировать под строительные задачи	может находить оптимальные решения	требуется сложной настройки

Анализ показывает, что параметрические подходы, такие как GAN и MCTS, позволяют напрямую оптимизировать инженерные показатели (теплопотери, себестоимость, расход материалов). В то же время, методы искусственного интеллекта расширяют визуальную вариативность проектных концепций, генерируя новые архитектурные формы [3,4]. Идеальное решение – их комбинация: алгоритмы обеспечивают контроль, а ИИ – визуальное разнообразие.

В этом контексте ключевую роль играют инструменты симуляции и моделирования, позволяющие количественно оценить проектные параметры еще до начала строительства. Таблица 3 содержит сравнительный анализ программных решений, подходящих для комплексной верификации генеративных проектов деревянных параметрических фасадов.

Таблица 3. Инструменты симуляции и моделирования

Инструмент	Назначение	Тип анализа	Особенности
Energy Plus	тепловой и энергетический расчёт	энергопотребление	самое распространённое программное обеспечение; поддерживает гибкую модель конструкции, библиотеку климата
Ladybug + Honeybee	плагин к Rhino/Grasshopper	энергопотребление, свет	позволяет интегрировать в блочный параметрический алгоритм (GH); визуализация результатов
IES VE / VE-API	комплексное моделирование	Многофункциональный (энергия, дневной свет, CFD)	профессиональная платформа; детальная отчетность; испытана на госпиталях
ClimateStudio / OpenStudio	разработка на основе SketchUp	энергорасчёт, вентилируемые фасады	User-friendly, основан на EnergyPlus с GUI; хорошо для быстрых проверок

Radiance / Daysim	освещённость (дневной свет)	дневной свет, визуализация	точный рендер освещённости; используется вместе с EnergyPlus (наблюдение DF%)
COMSOL / ANSYS Fluent	теплоперенос (приток ветра)	CFD-анализ	для изучения ветровой нагрузки и тепловых мостов; редко используется из-за сложности
SimaPro / One Click LCA	оценка жизненного цикла (LCA)	CO ₂ -эмиссии, энергоёмкость	оценивают embodied carbon материалов (CLT в сравнении бетон), удобны для «углеродного баланса»

При проектировании фасадов часто применяется многофакторный анализ с использованием различных инструментов. Важно проверять соответствие разработанных вариантов фасадов требованиям СП 50.13330, в частности, теплозащиту следует рассчитывать с повышенным коэффициентом запаса.

На основе анализа инструментов симуляции и моделирования (Таблица 3) и генеративных подходов (Таблица 2), в рамках исследования предложены два экспериментальных метода проектирования. Каждый метод ориентирован на решение специфических задач: от поиска эстетического образа до технической оптимизации характеристик.

Подход №1. Алгоритмическая оптимизация фасадных систем на основе климатического анализа (с использованием MCTS и генетических алгоритмов).

Суть подхода: Процесс проектирования трансформируется в математическую задачу оптимизации. Этот метод нацелен на создание высокоэффективных фасадных оболочек, где форма и расположение деревянных элементов (ламелей) определяются требованиями энергоэффективности.

Этапы реализации подхода №1:

Этап 1. Создание базовой параметрической модели: в среде Rhino + Grasshopper или Revit + Дупато задается геометрия фасадной сетки. Основными переменными выступают: угол поворота деревянной ламели, глубина выноса и шаг элементов.

Этап 2. Интеграция аналитических модулей: к модели подключаются плагины для светотехнического расчета (Ladybug/ Honeybee). Задаются климатические данные местности и нормативные требования по КЕО (коэффициенту естественной освещенности) для помещений реабилитационного центра.

Этап 3. Запуск цикла оптимизации: используется прием поиска в дереве Монте-Карло (MCTS) или генетический алгоритм (Galapagos/Wallacei). Система автоматически перебирает тысячи вариантов конфигурации ламелей, стремясь минимизировать теплопотупления летом и максимизировать инсоляцию зимой.

Процесс создания наборов параметров MCTS состоит из следующих этапов:

1. Архитектор настраивает MCTS, определяя глубину наборов параметров и область значений каждого параметра, чтобы обеспечить совместимость с параметрической моделью.
2. Алгоритм MCTS генерирует наборы числовых параметров, которые служат входными данными для параметрической модели.

3. Параметрическая модель обрабатывает эти входные данные, напрямую вычисляя количественные значения и, при необходимости, генерируя геометрические выходные данные.

4. Затем выбранные геометрические модели передаются в SD для создания изображений.

На рисунке 7 показано, как один набор параметров, сгенерированный с помощью алгоритма MCTS, соответствует параметрической модели. Например, первые семь параметров определяют компоновку конструкции, при этом каждый параметр соответствует определенной характеристике, такой, как тип компоновки и размеры. Любые дополнительные параметры игнорируются, если они не имеют отношения к компоновке.

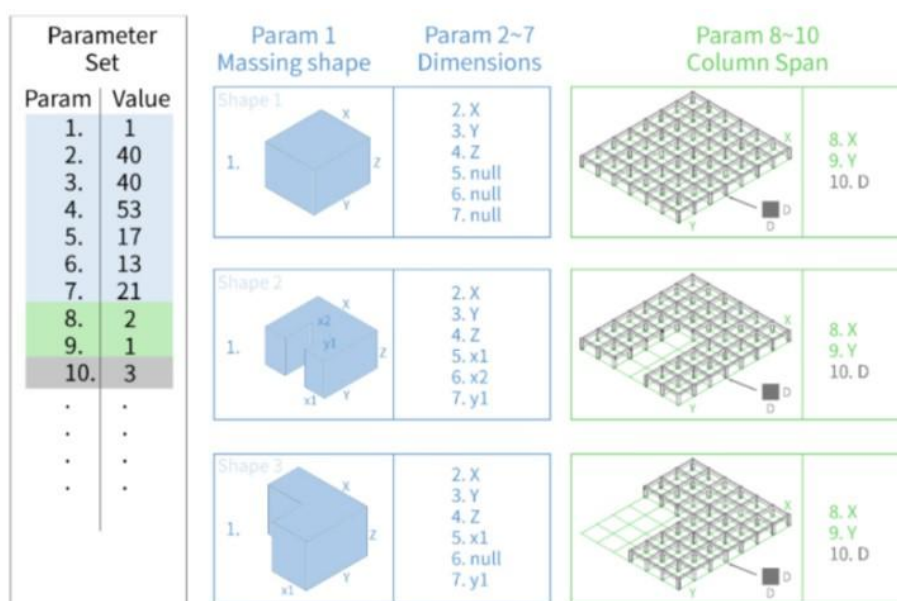


Рис. 7. Применение алгоритма MCTS

Этап 4. Экспорт для производства: оптимальное решение выгружается в виде набора координат и спецификаций для станков с ЧПУ, обеспечивая высокую точность сборки деревянных конструкций.

Результатом является «умная» оболочка, где плотность деревянного паттерна меняется в зависимости от ориентации фасада по сторонам света и функционального назначения внутренних помещений центра.

Подход №2. Проектирование на основе диффузионных моделей (генеративный ИИ).

Суть подхода: позволяет за короткое время создать матрицу генераций и на ее основе выбрать наиболее подходящий облик здания и обеспечить его органичное сочетание с ландшафтом и исторической средой (например, при ревитализации промышленных территорий).

Этапы реализации подхода №2:

Этап 1. Составление подробного задания (Prompt Engineering): архитектор описывает главные особенности будущего объекта – простыми словами перечисляет, каким он должен быть. Пример промта: «Создай фотореалистичную 3D-визуализацию проекта ревитализации исторической мельницы купцов Бобровых¹⁰ в современный

¹⁰ См. рисунок 8.

реабилитационный центр. Основной акцент – современный параметрический фасад из дерева. Сохраняй отсылки к исторической мельнице»¹¹.



Рис. 8. Фото мельницы купцов Бобровых, с. Юрятино, Калужская область; построена в 1885-1887 годах



Рис. 9. Результат генерации авторского текстового промта для концепции ревитализации мельницы купцов Бобровых в современный реабилитационный центр с деревянным параметрическим фасадом

Этап 2. Используем нейросеть (с инструментом ControlNet)¹², для быстрого создания нескольких вариантов фасада эскизных вариантов архитектурного решения здания. В результате можно увидеть, как будут выглядеть даже самые сложные параметрические фасады.

¹¹ См. рисунок 9.

¹² См. рисунок 10.

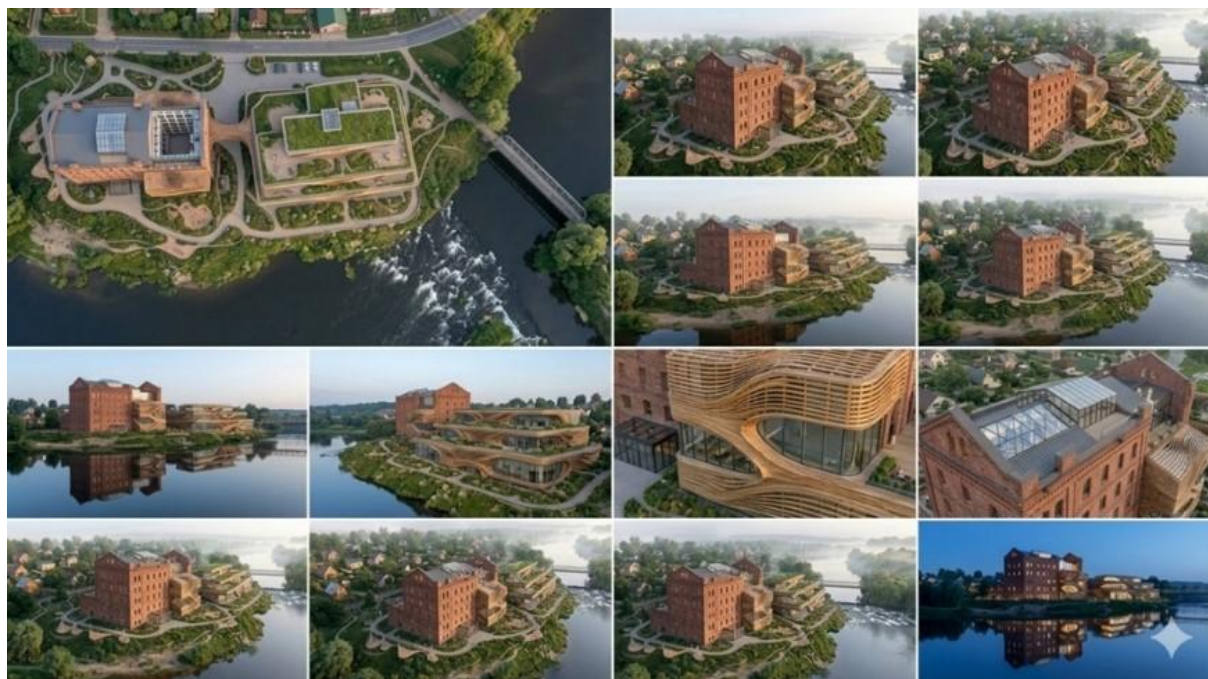


Рис. 10. Варианты деревянного параметрического фасада, полученные в нейросети с использованием ControlNet на основе исходной генерации и графического задания

Этап 3. Доработка проекта: полученные изображения визуально оценивают, насколько материал сочетается с окружением. Например, оценивается, как глубокие оттенки дерева сочетаются с ландшафтом реабилитационного центра.

Основное отличие двух подходов заключается в следующем: параметрические методы обеспечивают решения, соответствующие техническим требованиям, но требуют их предварительного детального описания. ИИ-методы, напротив, генерируют визуально привлекательные варианты на основе обучения, но не предоставляют точных расчетов. Для достижения оптимального результата возможно их комбинирование: например, параметрические алгоритмы могут создавать базовые варианты, которые затем ИИ улучшает с точки зрения визуальной составляющей (или наоборот). Сравнение характеристик обоих подходов представлено в таблице 4.

Таблица 4. Сравнительная таблица характеристик подходов

Критерий сравнения	Подход №1 Алгоритмическая оптимизация (MCTS/ Генетические алгоритмы)	Подход №2 Генеративный ИИ
Философия подхода	«Сверху-вниз»: форма следует за функцией и расчетами.	«Снизу-вверх»: форма следует за образом и ассоциациями.
Основной инструментарий	Rhino+Grasshopper, Ladybug, Wallacei, Dynamo	Stable Diffusion (ControlNet), Midjourney, LookX.
Вид итогового результата	Математическая 3D-модель (BIM-совместимая), массив координат	Высокодетализированное растровое изображение, концепт-арт

Степень контроля	Полная: архитектор управляет каждым узлом и параметром ламели	Опосредованная: через текстовые промты
Учет климата	Прямой: автоматический расчет инсоляции, затенения и теплопотерь	Эстетический: Визуальная имитация освещения и атмосферы
Работа с клееной древесиной (конструктивной и декоративной)	Проверяются сечения элементов, шаг несущей сетки, расход материала и допустимые потери при раскрое	Подбирается визуальный характер деревянной поверхности: фактура, плотность рисунка, цветовой тон и пластика фасадного слоя
Стадия проекта	Наиболее эффективно на стадиях концепции, проектной и рабочей документации, а также при подготовке данных для производства	Используется преимущественно на предпроектной стадии, при поиске эскизного образа и разработке концептуального предложения
Главный риск	Чрезмерная ориентация на расчетную логику может сузить архитектурный поиск и сделать форму излишне технической	Сгенерированный образ может оказаться труднопереводимым в конструктивную схему, узлы и рабочие чертежи

Сравнительный анализ показал, что алгоритмический и нейросетевой подходы к проектированию фасадов имеют как существенные различия, так и точки соприкосновения.

Алгоритмический подход отличается строго объективным характером. Его форма определяется физическими расчетами и инженерной логикой, что гарантирует высокую точность и реализуемость решений.

В отличие от него, *нейросетевой подход* ориентирован на субъективное восприятие, эстетику и скорость генерации идей. Он предлагает практически неограниченную вариативность художественных решений, но может быть менее точным в техническом плане.

Изолированное применение этих цифровых инструментов дает неполный результат. Нейросетевые инструменты наиболее эффективны на этапе поиска варианта фасадного решения. Затем, на следующей стадии, когда найденный образ требует проверки, вступают в силу параметрические алгоритмы и расчетные модели. Они позволяют оценить выбранное проектное решение по теплотехническим, конструктивным и другим параметрам, указанным в спецификациях материалов. Такая последовательность – «визуальная гипотеза – расчетная проверка – корректировка» – делает процесс проектирования более управляемым: сначала формируется широкий спектр вариантов, а затем выполняется их отбор и техническое уточнение.

Совместное применение этих подходов значительно повышает обоснованность проектных решений. Например, при работе с древесиной, рассматриваемой как возобновляемый материал с низким углеродным следом и выраженными средовыми качествами, цифровые инструменты позволяют точнее определить пластику фасада, расход материала и взаимосвязь ограждающих конструкций с климатическими условиями. Это особенно важно для реабилитационных центров, где архитектурная оболочка напрямую влияет на энергоэффективность здания, характер естественного освещения и восприятие внутренней среды.

В таком процессе профессиональная роль архитектора трансформируется. Она смещается в сторону постановки критериев и интерпретации результатов. Архитектор

задает параметры поиска, выбирает подходящие цифровые инструменты, оценивает полученные проектные варианты и проверяет их на соответствие производственным ограничениям и требованиям эксплуатации. Художественный образ фасадного решения остается ключевым требованием, но проходит через призму расчетных данных и практической применимости. Именно в этом заключается отличие профессионального экспертного архитектурного проектирования от свободной генерации изображений.

Выводы

В ходе исследования рассмотрены два подхода к проектированию деревянных фасадных конструкций реабилитационных центров. Выбор оптимального цифрового инструмента напрямую зависит от стадии проектирования и специфики поставленной задачи.

Первый подход основан на алгоритмических приемах, включая поиск Монте-Карло (MCTS) и генетические алгоритмы. Эти подходы применяются для подбора пластики фасада, оценки теплопотерь и оптимизации расхода древесины. Расчетная модель учитывает климатические параметры и помогает выбрать вариант с более устойчивыми эксплуатационными характеристиками.

Второй подход связан с применением искусственного интеллекта. Нейросетевые инструменты используются для генерации вариантов фасадных решений и проверки их гармоничности с контекстом. Основное преимущество этого метода – значительное расширение пространства для творческого поиска и эскизирования. Однако его ограничением является отсутствие прямой связи с конструктивной и нормативной проверкой.

Сравнительный анализ показал, что эти подходы рационально применять последовательно. Искусственный интеллект выступает в роли генератора вариантов фасадных решений, а алгоритмические расчеты служат для их проверки по техническим параметрам. Такая схема существенно снижает риск принятия решений, не соответствующих техническим и нормативным требованиям.

Практическая ценность работы заключается в сопоставлении двух проектных методов и разработке рекомендаций по выбору цифровых инструментов для проектирования параметрических фасадов реабилитационных центров. Предложенная логика может быть легко адаптирована к различным программным средам.

В контексте рассматриваемых подходов древесина играет центральную роль. Являясь возобновляемым ресурсом, она находит применение в фасадных системах, несущих конструкциях и внутренней отделке. Для реабилитационных объектов особенно важны перцептивные качества древесины: ее теплая фактура, природный рисунок и способность создавать более мягкое, комфортное пространство по сравнению с холодными материалами, такими как металл или стекло.

Для полного раскрытия преимуществ древесины необходимо раннее согласование архитектурного образа с расчетными параметрами. Компьютерные алгоритмы предоставляют уникальную возможность для: оценки формы фасада и конструктивной схемы; точного расчета расхода материала; учета климатических условий, ориентации здания и теплотехнических характеристик. Это позволяет не только снизить затраты на отопление и охлаждение, но и получить надежное расчетное обоснование для сложных архитектурных форм.

Внедрение алгоритмических и нейросетевых подходов трансформирует профессиональную задачу архитектора. Теперь его роль включает: формулирование целевых параметров проекта; настройку цифровых инструментов; анализ и отбор полученных вариантов с учетом эстетики, технологии, экологии и нормативных

требований; финальную проверку реализуемости концепции на всех этапах: от конструкции до эксплуатации.

Сочетание алгоритмического проектирования и искусственного интеллекта позволяет одновременно достичь высокой архитектурной выразительности, технологичности решений и соответствия принципам устойчивого развития. Для реабилитационных центров такой комплексный подход особенно важен, поскольку качество архитектурной среды напрямую влияет на самочувствие и комфорт пациентов и персонала в течение длительного времени пребывания.

Источники иллюстраций

Рис. 1. URL: <https://www.thinkwood.com/construction-projects/herrington-recovery-center> (дата обращения: 15.04.2026).

Рис. 2. KPMB Architects, 2013. URL: <https://www.kpmb.com/bridgepoint-active-healthcare/> (дата обращения: 15.04.2026).

Рис. 3. White Arkitekter, 2024. URL: <https://whitearkitekter.com/news/white-arkitekter-designs-swedens-first-hospital-building-with-a-timber-frame/> (дата обращения: 15.04.2026).

Рис. 4. ArchiExpo e-Magazine, 2023. URL: <https://emag.archiexpo.com/waldkliniken-eisenberg-redefines-hospitector-with-new-rehabilitation-clinic/> (дата обращения: 15.04.2026).

Рис. 5. URL: <https://www.archdaily.com/126290/rehabilitation-centre-groot-klimmendaal-koen-van-velsen> (дата обращения: 15.04.2026).

Рис. 6. URL: <https://www.archdaily.com/941540/maggies-leeds-centre-heatherwick-studio> (дата обращения: 15.04.2026).

Рис. 7. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00004-025-00822-2> (дата обращения: 15.04.2026).

Рис. 8, 9, 10. Изображения созданы автором с использованием ControlNet.

Список источников

1. The Role of Digital Twins and Generative AI in Sustainable Architectural Design // Buildings. 2024. Т. 14. № 12. С. 2156. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11080396/> (дата обращения: 15.04.2026). DOI: 10.3390/buildings14122156
2. AI-Augmented Parametric Façade Design: Exploring MCTS for Early-Stage Decision-Making // Nexus Network Journal. 2025. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00004-025-00822-2> (дата обращения: 15.04.2026). DOI: 10.1007/s00004-025-00822-2
3. Generative AI for Architectural Façade Design: Measuring Perceptual Alignment Across Geographical, Objective, and Affective Descriptors // Buildings. 2025. Т. 15. № 17. С. 3212. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/17/3212> (дата обращения: 15.04.2026). DOI: 10.3390/buildings15173212.
4. Laura Rodríguez-Labajos, Joanne Kinloch, Susan Grant, Geraldine O'Brien. The Role of the Built Environment as a Therapeutic Intervention in Mental Health Facilities: A Systematic Literature Review // United Nations Environment Programme (UNEP). 2025. URL: <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction-20242025> (дата обращения: 15.04.2026).
5. A State of the Art of the Overall Energy Efficiency of Wood Buildings – An Overview and Future Possibilities // Buildings. 2021. Т. 13. № 4. С. 987. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8068281/> (дата обращения: 15.04.2026). DOI: 10.3390/buildings13040987

References

1. The Role of Digital Twins and Generative AI in Sustainable Architectural Design. Buildings, 2024, vol. 14, no. 12, p. 2156. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11080396/> DOI: 10.3390/buildings14122156
2. AI-Augmented Parametric Façade Design: Exploring MCTS for Early-Stage Decision-Making. Nexus Network Journal, 2025. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00004-025-00822-2> DOI: 10.1007/s00004-025-00822-2
3. Generative AI for Architectural Façade Design: Measuring Perceptual Alignment Across Geographical, Objective, and Affective Descriptors. Buildings, 2025, vol. 15, no. 17, p. 3212. DOI: 10.3390/buildings15173212. Available at: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/17/3212>
4. Laura Rodríguez-Labajos, Joanne Kinloch, Susan Grant, Geraldine O'Brien the Role of the Built Environment as a Therapeutic Intervention in Mental Health Facilities: A Systematic Literature Review. United Nations Environment Programme (UNEP), 2025. Available at: <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction-20242025>
5. A State of the Art of the Overall Energy Efficiency of Wood Buildings – An Overview and Future Possibilities. Buildings, 2021, vol. 13, no. 4, p. 987. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8068281/> DOI: 10.3390/buildings13040987

ОБ АВТОРАХ

Акшов Эмиль Альмирович

Преподаватель кафедры «Информационные технологии в архитектуре», Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия
askshov@gmail.com

Гутникова Анастасия Алексеевна

Магистрант кафедры «Архитектура», Инженерная академия, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия
1132247999@rudn.ru

ABOUT THE AUTHORS

Akshov Emil A.

Lecturer, Department of Information Technology in Architecture, Moscow Architectural Institute (State Academy), Moscow, Russia
emil.askshov@gmail.com

Gutnikova Anastasia A.

Master's Student, Department of Architecture, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia
1132247999@rudn.ru

Статья поступила в редакцию 07.04.2026; одобрена после рецензирования 05.06.2026; принята к публикации 10.06.2026; опубликована 15.06.2026.