Научная статья

УДК 72.047:635.974

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СИСТЕМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ОЗЕЛЕНЕНИЯ ФАСАДОВ В УМЕРЕННО-КОНТИНЕНТАЛЬНОМ КЛИМАТЕ

Пухова Анастасия Игоревна, кандидат технических наук, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Россия, Хабаровск, anastasia_pukhova@yandex.ru;

Старков Алексей Игоревич, кандидат технических наук, начальник сектора, Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов НИЦ "Курчатовский институт", Россия, Москва, starkov.ai@mail.ru

Аннотация. В работе анализируется проблема интеграции систем вертикального озеленения в архитектурную среду городов с умеренно-континентальным климатом на примере Казани, где продолжительность вегетационного периода не превышает пяти месяцев. Авторы проводят сравнительный анализ трех конструктивных решений: тросовых, модульных кассетных и гидропонных панелей. Методология исследования включает натурные теплотехнические замеры на опытных фрагментах фасадов площадью девять квадратных метров в течение полного годового цикла, а также оценку пожарной безопасности с учетом сезонного изменения влажности фитомассы и объема отмершей древесины. Эксперимент показал, что в условиях суровых ветровых зим в гидропонных системах наблюдается значительная гибель растений вследствие промерзания корневой зоны, а их консервация требует высоких эксплуатационных затрат. Тросовые конструкции эффективно снижают летний перегрев стен, однако накапливают сухую биомассу, что создает существенные пожарные риски в виде кратковременных тепловых вспышек в весенний период. Модульные системы с минеральным субстратом и подобранным ассортиментом вечнозеленых и полулистопадных растений

обеспечивают оптимальный баланс. Они стабилизируют температурный режим ограждающих конструкций зимой, минимизируют угрозу распространения пламени и сохраняют декоративность фасада круглый год. Результаты работы позволяют проектировщикам выбирать тип системы вертикального озеленения с учётом климатических условий и требований пожарной безопасности.

Ключевые слова: вертикальное озеленение, биофильный дизайн, умеренно-континентальный климат, пожарная безопасность фасадов, теплотехнические показатели, модульные фитосистемы, городская среда, архитектурное проектирование, ограждающие конструкции.

Original article

COMPARATIVE ASSESSMENT OF VERTICAL LANDSCAPING SYSTEMS FOR FACADES IN A TEMPERATE CONTINENTAL CLIMATE

Pukhova Anastasia Igorevna, Candidate of Technical Sciences, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia, anastasia_pukhova@yandex.ru;

Starkov Aleksei Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Sector Head, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia, starkov.ai@mail.ru

Abstract. This paper analyzes the problem of integrating vertical gardening systems into the architectural environment of cities with a temperate continental climate, using Kazan as an example, where the growing season lasts no more than five months. The authors conduct a comparative analysis of three design solutions: cable-supported structures, modular cassette panels, and hydroponic panels. The research methodology includes in-kind thermal measurements on nine-square-meter test façade sections over a full annual cycle, as well as a fire safety assessment taking into account seasonal variations in phytomass moisture and the volume of dead wood. The experiment showed that in harsh, windy winters, hydroponic systems exhibit a critically high percentage of root zone freezing, requiring unjustified maintenance

costs. Cable-supported structures effectively reduce summer wall overheating, but accumulate dry biomass, creating significant fire risks in the form of short-term thermal flares in the spring. Modular systems with a mineral substrate and a selected assortment of evergreen and semi-deciduous plants provide an optimal balance. They stabilize the temperature of the building envelope in winter, minimize the risk of fire spread, and maintain the decorative appearance of the façade year-round. The results of this work allow designers to make informed choices about living wall types, based on the physical constraints of the environment and fire safety regulations.

Keywords: vertical gardening, biophilic design, temperate continental climate, fire safety of facades, thermal performance, modular phytosystems, urban environment, architectural design, enclosing structures.

Введение. Интенсивное уплотнение застройки современных городов неизбежно влечет за собой дефицит рекреационных зон и снижение общего уровня экологического комфорта [1], [2]. В этих условиях биофильный дизайн используется не только как эстетический приём, но и как инструмент архитектурного проектирования. Интеграция природных элементов в искусственную среду позволяет компенсировать нехватку наземных зеленых насаждений, однако требует поиска новых форматов озеленения, не связанных с изъятием ценных городских территорий и увеличением застроенных площадей [3], [4].

Вертикальное озеленение фасадов выступает наиболее рациональным ответом на данный градостроительный вызов, поскольку задействует неиспользуемые плоскости ограждающих конструкций. Архитектурная практика последних лет убедительно демонстрирует, что модульные фитосистемы способны не только формировать выразительный облик здания, но и существенно корректировать локальный микроклимат [5-7]. Полевые измерения, проведенные в условиях умеренного климата Центральной Европы, доказывают: растительный слой действует как эффективный термический

буфер, снижая температуру поверхности стены в пиковые летние периоды более чем на 10 °C за счет затенения и тепловой инерции [8]. Подобный пассивный эффект крайне важен для уменьшения энергозатрат на кондиционирование и улучшения теплового комфорта в прилегающих общественных пространствах.

Однако применение зарубежных проектных решений в Поволжье ограничено местными климатическими условиями [9]. Специфика умеренно-континентального климата на примере Казани, где зимние температуры регулярно опускаются до отметки -25 °C, а продолжительность вегетационного периода ограничена пятью-шестью месяцами, предъявляет особые требования к подбору растений и конструкции фасадных систем [10]. Если в летний сезон фитомасса активно участвует в теплообмене и испарении, то с наступлением холодов и переходом растений в состояние покоя их физическое и визуальное состояние кардинально меняется [11]. В холодный период фасад может терять декоративность, а накопление сухой растительной массы повышает пожарный риск.

Исследования пожароопасности зеленых фасадов показывают, что ключевым фактором риска в таких условиях выступает влажность растительных тканей [12-14]. Отмирающие и пересыхающие побеги, особенно у вечнозеленых или слабо листопадных видов, теряют влагу и приобретают свойства горючего материала. В отличие от жизнеспособных растений, которые способны к самозатуханию и препятствуют горизонтальному распространению пламени, сухая листва и мертвая древесина при возгорании выделяют тепло скачкообразно, создавая угрозу перехода огня на смежные конструкции и вышележащие этажи.

Таким образом, проектирование вертикального озеленения в условиях умеренно-континентального климата требует комплексного учёта декоративных, биологических, теплотехнических и эксплуатационных характеристик фасадных систем. Продолжительное воздействие отрицательных температур, сезонное изменение влажности субстрата и формирование сухой

растительной массы обусловливают необходимость оценки конструктивных решений на протяжении полного годового цикла. Цель исследования заключается в сравнительном анализе тросовой, модульной и гидропонной систем вертикального озеленения применительно к климатическим условиям Казани. В качестве основных критериев рассматриваются особенности формирования теплового режима фасада, жизнеспособность растений после зимовки, затраты на обслуживание и факторы эксплуатационной и пожарной безопасности.

Обзор литературы. Современные исследования вертикального озеленения фасадов рассматривают растительный покров как дополнительный элемент регулирования теплового взаимодействия ограждающих конструкций с окружающей средой. Полевые наблюдения свидетельствуют о влиянии затенения, испарения влаги и тепловой инерции растительной массы на температуру наружной поверхности стены. В отдельных экспериментальных условиях снижение температуры затенённой поверхности в летний период может достигать 10-11 °C по сравнению с открытыми участками ограждения [15].

Существенное ограничение существующих подходов связано с зависимостью эффективности вертикального озеленения от климатических условий. Результаты, полученные для регионов с мягким климатом, не могут непосредственно распространяться на территории с длительными периодами отрицательных температур. В умеренно-континентальном климате сезонные изменения состояния растений и субстрата определяют различия между летними теплотехническими преимуществами систем и их эксплуатационной устойчивостью в зимний период [16].

Отдельное направление исследований связано с пожарной безопасностью вертикального озеленения. Значимыми факторами являются влажность растительных тканей, наличие сухой фитомассы, свойства конструктивных компонентов и особенности расположения растительного слоя относительно

наружного ограждения [17, 18]. При этом биологическая сохранность растений, ремонтопригодность модулей и пожарные характеристики конструкции представляют собой самостоятельные показатели, которые необходимо оценивать раздельно. Следовательно, комплексное сравнение фасадных систем должно учитывать не только их способность снижать температуру поверхности в летний период, но и сезонную устойчивость растительного покрова, особенности обслуживания и характеристики конструктивной безопасности.

Организация и методология исследования. Объектом исследования выступил 9-этажный административный корпус в Ново-Савиновском районе Казани. Для экспериментальных фрагментов была выбрана юго-восточная ориентация, обеспечивающая интенсивное утреннее солнечное облучение. Несущая стена выполнена из газобетонных блоков толщиной 400 мм; предусмотрен вентилируемый зазор. На фасаде были смонтированы три опытных фрагмента размером 3×3 м каждый, имеющие единую базовую стену, одинаковую степень затенения от соседствующих объемов и сопоставимую исходную плотность растительного покрова. Для расчётов использован актуальный погодный файл Казани: расчётный зимний минимум составил −28 °C, продолжительность вегетации — 155–160 дней.

Для сравнения были выбраны три принципиально разных архитектурно-конструктивных решения (Таблица 1).

Таблица 1 - Конфигурация и биологические параметры исследуемых систем вертикального озеленения

Параметр	Система А: Тросовая (пристенная)	Система Б: Модульная (кассетная)	Система В: Гидропонная (панельная)
Конструктив	Стальные тросы, отступ от стены 10 см	Алюминиевый каркас, кассеты с минеральным субстратом (толщина 15 см), отступ 5 см	Войлочные карманы на несущей раме, система рециркуляции, отступ 3 см
Ассортимент	Parthenocissus tricuspidata (Девичий виноград трехостренный)	Euonymus fortunei (Бересклет Форчуна), Carex morrowii (Осока Морроу)	Heuchera spp. (Гейхера гибридная), Sedum spp. (Очиток)

LAI (лето/зима)	3.8 / 0.0 (полный листопад)	2.6 / 2.2 (вечнозеленые / полулистопадные)	2.0 / 0.5 (частичное отмирание надземной части)
Схема полива	Капельный полив от водопровода, ручной контроль	Автоматический капельный полив с датчиками влажности субстрата	Замкнутый контур рециркуляции с УФ-стерилизацией и автоматическим доливом
Зимний режим	Обрезка сухой лозы, естественная спячка	Ограниченный полив в оттепели, защита от весенних солнечных ожогов	Полный слив воды, продувка труб сжатым воздухом, укрытие корневой зоны теплоэкранами

Источник: разработано авторами.

Теплотехнические процессы моделировались в среде EnergyPlus для оценки годового энергопотребления, после чего данные верифицировались посредством натурного эксперимента. Для регистрации температурных градиентов датчики Pt100 установили в субстрате, воздушном зазоре и на поверхности растений, а для непрерывного измерения влажности использовали TDR-зонды.

При оценке пожарной безопасности учитывались температура фасада и влажность растительной массы. Опираясь на методологию испытаний горючести [2], авторы фиксировали процентное содержание сухой фитомассы в весенний период, что является прямым индикатором риска возникновения кратковременных вспышек пламени. Дополнительно учитывались доля погибших после зимовки растений и объём их необходимой замены, поскольку эти показатели влияют на сохранение декоративности фасада.

Результаты проведения исследования и их обсуждение. Анализ микроклиматических показателей выявил существенную разницу в поведении систем в зависимости от сезона. В летний период (июль-август) максимальное снижение температуры поверхности газобетонной стены зафиксировано для Системы А (тросовая) и Системы Б (модульная). Максимальная разница температур между открытым участком фасада и стеной под плотным покровом девичьего винограда достигала 10,8 °C, что согласуется с данными европейских исследований [18]. Гидропонная система показала снижение лишь на 6,5 °C, что

объясняется ограничением транспирации в периоды казанской летней засухи, несмотря на автоматический полив.

Зимние измерения (январь-февраль) продемонстрировали иную картину. Тросовая система, лишенная листвы, не оказывала существенного влияния на теплопотери стены, выполняя лишь незначительную функцию ветрозащиты. Модульная система с вечнозелеными растениями и толстым слоем субстрата обеспечила термическую стабилизацию, снизив амплитуду суточных колебаний температуры несущей стены на 4,2 °C. Гидропонная система, переведенная в режим консервации (слив воды и укрытие теплоэкранами), фактически превратилась в дополнительный ветрозащитный экран, однако из-за малой толщины войлока ее сопротивление теплопередаче осталось минимальным (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнительные показатели теплофизических и эксплуатационных характеристик систем

Показатель	Система А (Тросовая)	Система Б (Модульная)	Система В (Гидропонная)
Снижение t° поверхности (лето, пик)	10,8 °C	9,4 °C	6,5 °C
Сглаживание суточных колебаний t° (зима)	+0,2 °C (незначительно)	+4,2 °C (выраженно)	+1,1 °C (слабо)
Расход воды (средний за вегетацию)	4,5 л/м²/сут	6,2 л/м²/сут	8,8 л/м²/сут (с учетом потерь на испарение и продувку)
Трудозатраты на обслуживание (часов/год)	12 (обрезка, подвязка)	28 (замена погибших, стрижка, настройка полива)	45 (консервация на зиму, расконсервация, чистка форсунок)
Последствия зимней эксплуатации растительного покрова	Частичное обмерзание кончиков побегов — около 2 %	Замена 14 % кассет вследствие повреждения растительного покрова	Гибель 38 % учтённых экземпляров гейхеры

Источник: разработано авторами.

Наиболее существенный недостаток тросовой системы связан с повышенным пожарным риском. К концу апреля, до начала сокодвижения, в системе А накапливается значительная масса сухой лозы и прошлогодней листвы. Согласно принципам оценки горючести фитомассы [2], такой материал

при воздействии открытого источника огня или фасадного электрического оборудования способен к быстрому горизонтальному распространению пламени с образованием кратковременных высокотемпературных вспышек. Модульная и гидропонная системы, благодаря наличию влажного субстрата или войлока, даже в случае частичного усыхания надземной части демонстрируют высокую устойчивость к возгоранию, однако требуют строгого контроля за состоянием орошателей.

Оценка сезонной сохранности растительного покрова выявила существенные различия эксплуатационных характеристик рассматриваемых систем вертикального озеленения. Тросовая система с использованием девичьего винограда характеризовалась наиболее высокой устойчивостью к условиям зимнего периода; зафиксированные повреждения отдельных побегов не потребовали масштабного восстановления конструкции. Для модульной системы основным неблагоприятным фактором стали весенние солнечные ожоги вечнозелёного бересклета, в результате чего потребовалась замена приблизительно 14 % конструктивных кассет в течение первого года эксплуатации. В гидропонной системе после зимовки зарегистрирована гибель 38 % учтённых экземпляров гейхеры, связанная с повреждением корневой системы при промерзании войлочных элементов. Указанная доля характеризует потери растений данного вида и не является показателем повреждения 38 % конструктивных модулей. Таким образом, выявленные последствия зимней эксплуатации необходимо разграничивать по характеру повреждений: частичное обмерзание побегов, замену кассет и гибель отдельных растений. Различие указанных показателей учитывается при сравнительной оценке жизнеспособности растительного покрова и эксплуатационных затрат (таблица 3).

Таблица 3 - Матрица рисков и архитектурно-эксплуатационной целесообразности

Критерий оценки	Система А (Тросовая)	Система Б (Модульная)	Система В: Гидропонная)
Архитектурная выразительность	Сезонная (лето — зеленый ковер, зима — графика тросов)	Круглогодичная стабильность, плотная текстура	Круглогодичная, но с риском выпадения растений
Пожарный риск (весенний период)	Высокий (накопление сухой фитомассы)	Низкий (влага в субстрате)	Низкий (влага в субстрате)
Ветровая устойчивость	Высокая (гибкое крепление, обдувание)	Средняя (парусность кассет, риск срыва при урагане)	Низкая (расслоение войлока, срыв карманов)
Рекомендация для климата Казани	Оптимально для теневых и северных фасадов, а также для экономичного летнего охлаждения	Рекомендуется для общественных зданий, фасады которых должны сохранять декоративность круглый год	Не рекомендуется из-за экстремальных зимних рисков и высокой стоимости эксплуатации

Источник: разработано авторами.

Проведенный натурно-расчетный эксперимент в условиях умеренно-континентального климата Казани демонстрирует, что универсального решения для вертикального озеленения не существует. Тросовые системы, обладая выдающейся летней эффективностью охлаждения и минимальной стоимостью, несут в себе скрытые пожарные риски весной из-за накопления сухой биомассы и не обеспечивают зимней теплоизоляции. Гидропонные панели, несмотря на технологическую привлекательность, оказались уязвимыми к промерзанию корневой зоны в условиях ветровых зим и потребовали значительных затрат на консервацию и восстановление. Модульные кассетные системы с минеральным субстратом и подобранным ассортиментом полулистопадных и вечнозеленых видов представляют собой наиболее сбалансированный компромисс. Они обеспечивают стабильный термический буфер, минимизируют пожарные угрозы за счет удержания влаги в субстрате и сохраняют архитектурную выразительность фасада на протяжении всего года, что делает их предпочтительным выбором для ответственных городских объектов в рассматриваемом климатическом регионе.

Выводы. Результаты комплексного натурно-расчетного эксперимента

свидетельствуют о необходимости пересмотра устоявшихся подходов к интеграции растительных компонентов в городскую среду. Полученные результаты показывают, что вертикальное озеленение выполняет не только декоративную, но и терморегулирующую функцию, влияя на микроклимат окружающего пространства. Для архитектуры умеренно-континентального пояса, где сезонные температурные амплитуды достигают критических значений, адаптация биофильных концепций требует отказа от прямого копирования зарубежных аналогов. Архитектурные и конструктивные решения для фасадного озеленения должны учитывать биологические циклы растений и климатические условия эксплуатации.

Анализ теплофизических процессов в ограждающих конструкциях диктует необходимость дифференцированного выбора типологии озеленения в зависимости от функционального назначения сооружения. Модульные кассетные решения с минеральным субстратом демонстрируют оптимальный баланс между летним затенением и зимней теплоизоляцией, выступая наиболее надежным инструментом пассивного энергосбережения. В то же время гидропонные панели, несмотря на их технологическую привлекательность и визуальную легкость, оказываются уязвимыми перед экстремальными ветровыми и температурными нагрузками, что неизбежно ведет к деградации растительного покрова и удорожанию эксплуатации. Проектировщикам следует закладывать в архитектурную концепцию не только эстетику живых стен, но и физическую возможность их консервации в зимний период, предусматривая скрытые ниши для размещения инженерных узлов, дренажных систем и теплозащитных экранов.

Не менее критичным аспектом, который специалистам предстоит интегрировать в проектную практику, становится обеспечение пожарной безопасности, выходящее за рамки простого подбора негорючих материалов основания. Главный фактор риска связан с состоянием растительной массы: при недостаточном уходе за тросовыми системами и вечнозелёными растениями на

фасаде могут накапливаться отмершие побеги и сухая листва, создающие условия для кратковременных интенсивных вспышек пламени. Следовательно, архитектор обязан закладывать в проект беспрепятственную доступность фасада для регулярной агротехнической обрезки. Конфигурация здания, наличие выступающих козырьков и пожарных рассечек должны формировать не только внешний облик, но и обеспечивать безопасную траекторию движения обслуживающего персонала, превращая рутинный уход за растениями в неотъемлемую часть жизненного цикла сооружения.

Дальнейшее развитие темы вертикального озеленения в отечественной архитектуре видится в углублении междисциплинарного диалога между зодчими, теплотехниками и дендрологами. Разработка нормативной базы и каталогов сочетаний растений, проверенных в конкретных климатических зонах, станет следующим шагом к более широкому внедрению зелёных фасадов. Творческая концепция архитектурного объекта, интегрирующего природу в искусственную среду, должна базироваться на глубоком понимании физико-технических характеристик ограждающих конструкций и биологических особенностей растений. Только такой синтез инженерного расчета и архитектурного мастерства позволит гарантировать безопасность, экологический комфорт и эстетическую выразительность городских пространств на протяжении десятилетий.

Список литературы

1. Лейкина Д. К., Океанов Г. В., Бенуж А. А. Вертикальное озеленение. Опыт нормирования // Academia. Архитектура и строительство. — 2024. — № 2. — С. 71–79. — DOI: 10.22337/2077-9038-2024-2-71-79.

2. Gao Y., Farrokhirad E., Pitts A. The Impact of Orientation on Living Wall Façade Temperature: Manchester Case Study // Sustainability. — 2023. — Vol. 15, No. 14. — Art. 11109. — DOI: 10.3390/su151411109.

3. Иванова Н. В., Ганжа О. А. Экологичное вертикальное озеленение в проектировании высотных зданий // Вестник Волгоградского государственного

архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2024. — Вып. 1 (94). — С. 203–214. — DOI: 10.35211/18154360_2024_1_203.

4. De Groeve M., Kale E., Godts S., Orr S. A., De Kock T. Impact of Vertical Greening on Urban Microclimate and Historic Building Materials: A Meta-Analysis // Building and Environment. — 2024. — Vol. 253. — Art. 111365. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111365.

5. Коростелева Н. В., Бучина В. Б. Вертикальное озеленение фасадов зданий как часть городской экосистемы // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2024. — Вып. 1 (94). — С. 215–223. — DOI: 10.35211/18154360_2024_1_215.

6. Su M., Jie P., Li P., Yang F., Huang Z., Shi X. A Review on the Mechanisms Behind Thermal Effect of Building Vertical Greenery Systems (VGS): Methodology, Performance and Impact Factors // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 303. — Art. 113785. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113785.

7. Иванова Н. В., Ганжа О. А. Интеграция эколого-эстетических решений вертикального озеленения в проектирование оболочки здания // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2025. — Вып. 1 (98). — С. 236–246. — DOI: 10.35211/18154360_2025_1_236.

8. Bakhtyari V., Fattahi K., Movahed K., Franz A. Investigating the Effect of Living Walls on Cooling Energy Consumption in Various Urban Microclimates, Building Heights, and Greenery Coverage Areas // Sustainability. — 2024. — Vol. 16, No. 2. — Art. 920. — DOI: 10.3390/su16020920.

9. Коростелева Н. В., Бучина В. Б. Вертикальное озеленение зданий как инновационный метод благоустройства городских территорий (на примере города Волгограда) // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. — 2024. — № 4 (31). — С. 69–77. — DOI: 10.36622/2541-9110.2024.31.4.008.

10. Nesci V., Ballarini I., Rando Mazzarino P., Corrado V. Living Walls and Green Façades: An Implementation Code for Energy Simulation // Buildings. — 2024. — Vol. 14, No. 7. — Art. 2040. — DOI: 10.3390/buildings14072040.

11. Смирнов Ю. Н., Уланбек уулу Актан. Использование биофильного урбанизма для реновации микрорайона «Восток-5» в г. Бишкеке // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. — 2025. — Т. 25, № 8. — С. 189–196. — DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-8-189-196.

12. Reyhani M., Santolini E., Tassinari P., Torreggiani D. Environmental Assessment of Design Choices of Green Walls Based for Materials Combination and Plants // The International Journal of Life Cycle Assessment. — 2023. — Vol. 28. — P. 1078–1091. — DOI: 10.1007/s11367-023-02181-x.

13. Березина А. А., Казанцев П. А., Шиян А. Ю. Особенности пространственной организации устойчивой к климатическим изменениям городской среды на основе систем озеленения в условиях юга Приморья // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2025. — № 3 (64). — С. 162–183. — DOI: 10.24866/2227-6858/2025-3/162-183.

14. Khan I. H., Munawer T. A Systematic Review of Economic Sustainability of Vertical Greenery Systems for Buildings // Construction Economics and Building. — 2024. — Vol. 24, No. 1–2. — P. 119–143. — DOI: 10.5130/AJCEB.v24i1/2.8710.

15. Chen S., Olivieri F., Peng L., Li J. Benefits and Monetary Values of Vertical Greening Systems: A Semi-Systematic Review // Building and Environment. — 2025. — Vol. 284. — Art. 113463. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2025.113463.

16. Shao Y., Ding D., Zhao J. A Systematic Review of Vertical Greenery: Environmental Impacts, Architectural Innovations, and Future Directions // Sustainability. — 2026. — Vol. 18, No. 14. — Art. 7153. — DOI: 10.3390/su18147153.

17. Engel T., Kahler J. Fire Safety for Green Façades: Part 2: Full-Scale Façade Fire Tests and Means for Fire-Safe Green Façade Design with Climbing Plants on Trellises // Fire Technology. — 2026. — Vol. 62. — Art. 51. — DOI: 10.1007/s10694-025-

01826-7.

18. Rico M. A., Olivieri F., Balaguera A., Zapata L. F. Life Cycle Assessment of Green Wall Systems in the Built Environment: A Systematic Review of System Boundaries, Inventories, Methodological Gaps, and Design Implications // Buildings. — 2026. — Vol. 16, No. 13. — Art. 2627. — DOI: 10.3390/buildings16132627.

References

1. Lejkina D. K., Okeanov G. V., Benuzh A. A. Vertikal`noe ozelenenie. Opy`t normirovaniya // Academia. Arxitektura i stroitel`stvo. — 2024. — № 2. — S. 71–79. — DOI: 10.22337/2077-9038-2024-2-71-79.

2. Gao Y., Farrokhirad E., Pitts A. The Impact of Orientation on Living Wall Façade Temperature: Manchester Case Study // Sustainability. — 2023. — Vol. 15, No. 14. — Art. 11109. — DOI: 10.3390/su151411109.

3. Ivanova N. V., Ganzha O. A. E`kologichnoe vertikal`noe ozelenenie v proektirovanii vy`sotny`x zdanij // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. Seriya: Stroitel`stvo i arxitektura. — 2024. — Vy`p. 1 (94). — S. 203–214. — DOI: 10.35211/18154360_2024_1_203.

4. De Groeve M., Kale E., Godts S., Orr S. A., De Kock T. Impact of Vertical Greening on Urban Microclimate and Historic Building Materials: A Meta-Analysis // Building and Environment. — 2024. — Vol. 253. — Art. 111365. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111365.

5. Korosteleva N. V., Buchina V. B. Vertikal`noe ozelenenie fasadov zdanij kak chast` gorodskoj e`kosistemy` // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. Seriya: Stroitel`stvo i arxitektura. — 2024. — Vy`p. 1 (94). — S. 215–223. — DOI: 10.35211/18154360_2024_1_215.

6. Su M., Jie P., Li P., Yang F., Huang Z., Shi X. A Review on the Mechanisms Behind Thermal Effect of Building Vertical Greenery Systems (VGS): Methodology, Performance and Impact Factors // Energy and Buildings. — 2024. — Vol. 303. — Art. 113785. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113785.

7. Ivanova N. V., Ganzha O. A. Integraciya e`kologo-e`steticheskix reshenij

vertikal`nogo ozeleneniya v proektirovanie obolochki zdaniya // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. Seriya: Stroitel`stvo i arxitektura. — 2025. — Vy`p. 1 (98). — S. 236–246. — DOI: 10.35211/18154360_2025_1_236.

8. Bakhtyari V., Fattahi K., Movahed K., Franz A. Investigating the Effect of Living Walls on Cooling Energy Consumption in Various Urban Microclimates, Building Heights, and Greenery Coverage Areas // Sustainability. — 2024. — Vol. 16, No. 2. — Art. 920. — DOI: 10.3390/su16020920.

9. Korosteleva N. V., Buchina V. B. Vertikal`noe ozelenenie zdanij kak innovacionny`j metod blagoustrojstva gorodskix territorij (na primere goroda Volgograda) // Zhilishhnoe xozyajstvo i kommunal`naya infrastruktura. — 2024. — № 4 (31). — S. 69–77. — DOI: 10.36622/2541-9110.2024.31.4.008.

10. Nesci V., Ballarini I., Rando Mazzarino P., Corrado V. Living Walls and Green Façades: An Implementation Code for Energy Simulation // Buildings. — 2024. — Vol. 14, No. 7. — Art. 2040. — DOI: 10.3390/buildings14072040.

11. Smirnov Yu. N., Ulanbek uulu Aktan. Ispol`zovanie biofil`nogo urbanizma dlya renovacii mikrorajona «Vostok-5» v g. Bishkeke // Vestnik Ky`rgy`zsko-Rossijskogo Slavyanskogo universiteta. — 2025. — T. 25, № 8. — S. 189–196. — DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-8-189-196.

12. Reyhani M., Santolini E., Tassinari P., Torreggiani D. Environmental Assessment of Design Choices of Green Walls Based for Materials Combination and Plants // The International Journal of Life Cycle Assessment. — 2023. — Vol. 28. — P. 1078–1091. — DOI: 10.1007/s11367-023-02181-x.

13. Berezina A. A., Kazancev P. A., Shiyan A. Yu. Osobennosti prostranstvennoj organizacii ustojchivoj k klimaticheskim izmeneniyam gorodskoj sredy` na osnove sistem ozeleneniya v usloviyax yuga Primor`ya // Vestnik Inzhenernoj shkoly` Dal`nevostochnogo federal`nogo universiteta. — 2025. — № 3 (64). — S. 162–183. — DOI: 10.24866/2227-6858/2025-3/162-183.

14. Khan I. H., Munawer T. A Systematic Review of Economic Sustainability of

Vertical Greenery Systems for Buildings // Construction Economics and Building. — 2024. — Vol. 24, No. 1–2. — P. 119–143. — DOI: 10.5130/AJCEB.v24i1/2.8710.

15. Chen S., Olivieri F., Peng L., Li J. Benefits and Monetary Values of Vertical Greening Systems: A Semi-Systematic Review // Building and Environment. — 2025. — Vol. 284. — Art. 113463. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2025.113463.

16. Shao Y., Ding D., Zhao J. A Systematic Review of Vertical Greenery: Environmental Impacts, Architectural Innovations, and Future Directions // Sustainability. — 2026. — Vol. 18, No. 14. — Art. 7153. — DOI: 10.3390/su18147153.

17. Engel T., Kahler J. Fire Safety for Green Façades: Part 2: Full-Scale Façade Fire Tests and Means for Fire-Safe Green Façade Design with Climbing Plants on Trellises // Fire Technology. — 2026. — Vol. 62. — Art. 51. — DOI: 10.1007/s10694-025-01826-7.

18. Rico M. A., Olivieri F., Balaguera A., Zapata L. F. Life Cycle Assessment of Green Wall Systems in the Built Environment: A Systematic Review of System Boundaries, Inventories, Methodological Gaps, and Design Implications // Buildings. — 2026. — Vol. 16, No. 13. — Art. 2627. — DOI: 10.3390/buildings16132627.

Статья поступила в редакцию 09.07.2026; одобрена после рецензирования 20.08.2026; принята к публикации 08.10.2026.

The article was submitted 09.07.2026; approved after peer review 20.08.2026; accepted for publication 08.10.2026.