

УДК 69.05

Ефимова Кристина Сергеевна, бакалавр, Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-
Петербург

МОДЕРНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИРОДНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ РЕШЕНИЙ

Аннотация

Целью исследования является анализ технических и эксплуатационных аспектов интеграции природно-ориентированных решений (NbS) в существующие строительные конструкции при модернизации зданий. Рассмотрены классификация зеленых крыш и фасадов, особенности их конструктивного исполнения и требования к несущей способности оснований. Рассмотрены также расчет ветровых нагрузок для интенсивного озеленения и оценка биоуглеродного потенциала растительности. На основе анализа жизненного цикла (LCA) оценена экологическая и экономическая эффективность внедрения NbS. Выявлены основные барьеры масштабирования технологий, включая нормативные ограничения и высокие капитальные затраты. Сделан вывод о необходимости применения цифровых инструментов (BIM, IoT) для мониторинга состояния конструкций и повышения эффективности управления зелеными системами.

Abstract

The aim of the study is to analyze the technical and operational aspects of integrating Nature-based Solutions (NbS) into existing building structures during building modernization. The classification of green roofs and facades, features of their structural design, and requirements for the load-bearing capacity of bases are reviewed. The calculation of wind loads for intensive greening and the assessment

of the biocarbon potential of vegetation are also examined. Based on Life Cycle Assessment (LCA), the environmental and economic efficiency of NbS implementation is evaluated. Key barriers to technology scaling are identified, including regulatory constraints and high capital costs. It is concluded that digital tools (BIM, IoT) are necessary for monitoring structural conditions and improving the management efficiency of green systems.

Ключевые слова: природно-ориентированные решения; зеленые крыши; модернизация зданий; несущая способность; ветровые нагрузки; оценка жизненного цикла; BIM; устойчивое строительство

Keywords: nature-based solutions; green roofs; building modernization; load-bearing capacity; wind loads; life cycle assessment; BIM; sustainable construction

Введение

Природно-ориентированные решения (NbS), такие как зелёные крыши, фасады и стены, всё чаще рассматриваются как инструмент модернизации существующих зданий, позволяющий одновременно повысить энергоэффективность, оптимизировать управление ливневыми стоками, смягчить эффект городского теплового острова, поддержать биоразнообразие и улучшить микроклимат прилегающей территории. Интеграция NbS в процесс реконструкции согласуется с целями достижения углеродной нейтральности (баланса выбросов и поглощения парниковых газов) к 2050 году, а также способствует реализации концепции «города-губки» через эффективное удержание влаги, но их внедрение требует преодоления технических, экономических и нормативных барьеров, а также учёта возможного структурного воздействия на существующие строительные конструкции.

Классификация и основные принципы природно-ориентированных решений (NbS)

NbS для зданий классифицируются по типу конструкции, глубине субстрата, уровню обслуживания и конструктивному исполнению.

Вертикальное озеленение включает фасадные системы (прямые и не прямые) и живые стены (модульные системы с гидропоникой), требующие интегрированных систем полива и дренажа.

Зеленые крыши классифицируются на экстенсивные (субстрат 80-150 мм), полуинтенсивные (150-300 мм) и интенсивные (>300 мм), различающиеся нагрузкой на конструкцию и требованиями к обслуживанию. NbS обеспечивают задержание 50-90% осадков, снижение температуры поверхности на 3-10 °С и улучшение качества воздуха [4]. Синергетический эффект достигается при сочетании с фотоэлектрическими панелями, КПД которых повышается за счет охлаждения растительностью.

При проектировании интенсивных зелёных крыш необходимо учитывать не только эксплуатационные характеристики, но и биоуглеродный потенциал различных видов растительности, ведь, например, высокие деревья (магнолия, красный тутовник, боярышник) способны секвестрировать значительно больше углерода по сравнению с низкорослыми травами или газонами [5]. Это делает выбор вегетации очень важным фактором для достижения углеродной нейтральности здания.

Технологии интеграции NbS в модернизацию строительных конструкций

Интеграция NbS в существующие конструкции требует инженерного подхода, который начинается с оценки несущей способности кровли или фасада. Применяются методы неразрушающего контроля, дистанционное зондирование и ИИ-скрининг на основе спутниковых снимков и открытых баз данных для быстрого отбора зданий, подходящих для озеленения без структурного усиления.

Конструктивными решениями являются использование легких инженерных субстратов с контролируемой насыщенной плотностью и низкой долей органических компонентов для предотвращения усадки; многослойные системы: водоотводящие пластины или гранулированные дренажные среды, синтетические фильтровальные ткани, устойчивые к засорению,

корнезащитные барьеры из ПВХ и эластичные гидроизоляционные мембраны, устойчивые к проколам и УФ-излучению. Для крыш с уклоном более 2:12 дополнительно применяются противоскользящие слои, кабельные системы анкеровки, ячеистые структуры и модульные зелёные стеновые системы, адаптированные для скатных кровель [1].

Также следует уделить внимание расчёту ветровых нагрузок для деревьев на крышах. Коэффициент аэродинамического сопротивления (C_D) для деревьев на крышах значительно варьируется при низких скоростях ветра из-за флексуальных вибраций ствола. Для консервативной оценки ветрового опрокидывающего момента рекомендуется использовать верхние 50% данных коэффициентов сопротивления. Для ели обыкновенной при скорости ветра 30 м/с оценочный C_D составляет 0,594, а для берёзы - 0,154. Эти данные необходимы для точного расчёта моментов выкорчевывания (M_0)[2].

Для учета сложных нагрузок в процессе эксплуатации необходима интеграция с BIM и концепцией «Цифрового двойника жизненного цикла здания». Такой подход позволяет не только моделировать термические характеристики и управлять поливом через IoT-датчики, но и отслеживать состояние конструкции в реальном времени. В частности, для оперативного выявления дефектов, таких как протечки, применяются системы векторного картирования электрического поля.

Благодаря этому традиционная статическая оценка заменяется динамической моделью, объединяющей данные IoT, машинное обучение и семантическую интероперабельность. На базе этих данных реализуются синергетические подходы: задержание воды в резервуарах под кровлей для последующего использования в системах полива или сброса в канализацию, комбинация зелёных систем с фотоэлектрическими панелями.

Оценка эффективности и барьеры внедрения

Оценка эффективности NbS традиционно проводится по техническим, экологическим и экономическим критериям. Анализ жизненного цикла и стоимости интенсивных зелёных крыш в рамках

50-летнего срока эксплуатации показал, что наибольший вклад в глобальный потенциал потепления вносят фаза производства материалов и эксплуатационная энергия, связанная с автоматическим орошением [5].

Выбор вегетации, требующей меньшего полива и ухода, снижает эксплуатационные расходы, однако чувствительный анализ выявил существенную зависимость экономической эффективности от конкретной климатической зоны. Экономические выгоды от внедрения NbS могут включать увеличение стоимости недвижимости на 7-20%, снижение эксплуатационных затрат и возможность получения налоговых льгот.

Поэтому к основным барьерам внедрения NbS относятся высокие капитальные затраты и стоимость обслуживания, недостаточная несущая способность старых зданий, отсутствие единых строительных норм и стандартизированных подходов к сертификации NbS, а также риски пожарной безопасности, связанные с наличием сухой биомассы, действующей как «топливная лестница» [3]. Немаловажны и законодательные пробелы: действующие нормы пожарной безопасности и энергетические директивы часто не учитывают изоляционные и охлаждающие преимущества зеленых систем. Кроме того, на пути масштабирования NbS стоят сложности в условиях плотной городской застройки, фрагментированное обслуживание, неопределённость в распределении рисков между застройщиками, страховщиками и управляющими компаниями, а также необходимость привлечения специализированных кадров и цифровых инструментов для проектирования, мониторинга и управления.

Для преодоления указанных барьеров предлагается системный подход, включающий идентификацию целей и контекста, этапы планирования и исполнения, а также последующий обзор, адаптивное управление и тиражирование успешных практик на уровне города и отдельных территорий.

Перспективы развития и заключение

Перспективы развития NbS неразрывно связаны с цифровизацией: интеграция искусственного интеллекта, цифровых двойников и IoT позволит

автоматизировать полив, прогнозировать нагрузки и контролировать безопасность конструкций в реальном времени. Также ожидается появление стандартизированных методов оценки, модульных решений и гибридных систем, сочетающих озеленение с энергогенерацией.

Таким образом, природно-ориентированные решения становятся закономерным этапом эволюции строительной отрасли, предлагая ответ на вызовы ресурсного дефицита и экологического воздействия. Однако переход к массовому внедрению NbS требует решения комплексных задач: от обеспечения конструктивной безопасности и долговечности материалов до создания эффективной системы долгосрочного мониторинга. Успех зависит от междисциплинарного подхода, объединяющего инженеров, архитекторов, экологов и законодателей. Разработка единых стандартов, образовательных программ и цифровых инструментов станет ключом к интеграции этих технологий в устойчивую строительную индустрию будущего.

Список литературы

1. Dunnett N., Kingsbury N. Structural implications of green roofs, terraces, and walls // SEAOC 2008 Convention Proceedings. 2008. С. 1-12.
2. Love J. C., Jašarević M., Omenzetter P., Fassman E. Seismic response of green roofs // Earthquake Spectra. 2014. Т. 30, № 4. С. 1589-1605.
3. Perini K., Magliocco M. Challenges and potentials of green roof retrofit: A case study // Technology, Image and Green Digital Transition. 2023. С. 865-875.
4. Santamouris M. Green roof systems: A review of the literature // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Т. 415. Ст. 012054.
5. Shafique M., Kim M., Rafiq R. Life cycle assessment of green roofs: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Т. 64. Ст. 229–245.

References

1. Dunnett N., Kingsbury N. Structural implications of green roofs, terraces, and walls // SEAOC 2008 Convention Proceedings. 2008. P. 1-12.

2. Love J. C., et al. Seismic response of green roofs // *Earthquake Spectra*. 2014. Vol. 30, № 4. P. 1589-1605.
3. Perini K., Magliocco M. Challenges and potentials of green roof retrofit: A case study // *Technology, Image and Green Digital Transition*. 2023. P. 865-875.
4. Santamouris M. Green roof systems: A review of the literature // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 415. Art. 012054.
5. Shafique M., Kim M., Rafiq R. Life cycle assessment of green roofs: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 64. P. 229–245.