Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2025, Том 17, № 5 / 2025, Vol. 17, Iss. 5 https://esj.today/issue-5-2025.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/49NZVN525.pdf

DOI: 10.15862/49NZVN525 (https://doi.org/10.15862/49NZVN525)

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Свириденко, В. А. Мониторинг углеродного следа зданий на различных стадиях строительства в зависимости от выбора строительных материалов / В. А. Свириденко // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 5. — URL: https://esj.today/PDF/49NZVN525.pdf. DOI: 10.15862/49NZVN525.

For citation:
Sviridenko V.A. Monitoring of building carbon footprint at different construction stages depending on building materials selection. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(5): 49NZVN525. Available at: https://esj.today/PDF/49NZVN525.pdf. DOI: 10.15862/49NZVN525. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 504.004

Свириденко Вадим Андреевич
ООО «Инжиниринговая корпорация «ИРБИС», Санкт-Петербург, Россия
Руководитель Департамента по цифровому сопровождению проектов
E-mail: vadsvirid@list.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5557-8112
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1232951
WoS: https://www.webofscience.com/wos/author/rid/JZU-0685-2024
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57224220479

Мониторинг углеродного следа зданий на различных стадиях строительства в зависимости от выбора строительных материалов

Аннотация. В современных условиях проблема мониторинга углеродного следа зданий приобретает особую актуальность, учитывая, что строительная отрасль выступает одним из крупнейших источников выбросов парниковых газов, формируя до 39 % общемировых антропогенных выбросов CO_2. Исследование посвящено комплексному анализу изменений выбросов CO_2 и углеродного следа зданий при использовании различных строительных материалов на всех этапах жизненного цикла объекта. Особое внимание уделяется влиянию материалов на экологическую нагрузку на стадиях производства, транспортировки, монтажа, эксплуатации и утилизации. Методологическая база исследования опирается на международные стандарты ISO по оценке жизненного цикла и углеродного следа продукции. В рамках работы проведён детальный сравнительный анализ экологических характеристик различных строительных материалов с использованием данных экологических продуктовых деклараций (EPD). В ходе исследования установлено, что различные строительные материалы демонстрируют существенные различия в углеродном следе на протяжении всего жизненного цикла. Выявлено, что материалы на основе нефтепродуктов имеют более высокие показатели выбросов, в то время как минеральная вата показывает минимальные значения на всех стадиях. Значительным фактором, влияющим на экологическую эффективность материала, оказалась возможность его вторичной переработки. Исследование подтвердило, что замена традиционных материалов на экологически чистые альтернативы способна существенно снизить углеродный след здания на всех этапах его существования. Наибольший потенциал для сокращения выбросов CO_2 выявлен на стадии производства материалов, что подчёркивает важность правильного выбора материалов на этапе проектирования. Разработанные рекомендации по

оптимизации выбора материалов направлены на минимизацию углеродного следа и повышение экологической эффективности строительства.

Ключевые слова: углеродный след; строительные материалы; мониторинг выбросов; жизненный цикл здания; экологическая устойчивость; парниковые газы; CO_2

Введение

В современных условиях глобальные экологические вызовы, связанные с изменением климата и усилением антропогенного воздействия на природную среду, создали острую необходимость в проведении всестороннего анализа эмиссии парниковых газов в строительной отрасли. Особую значимость приобретает исследование выбросов диоксида углерода (CO_2) на всех этапах существования зданий. Строительная отрасль выступает одним из ключевых источников антропогенных выбросов, формируя до 39 % общемирового объёма эмиссии CO_2 [1]. В этих условиях особую актуальность приобретает разработка эффективных механизмов контроля и минимизации углеродного следа на всех этапах строительных процессов [2].

Важным инструментом в системе управления углеродными выбросами становится детальный анализ влияния различных строительных материалов на общую экологическую нагрузку объектов. Существенные различия в составе материалов, технологиях их производства, логистике и процессах утилизации создают значительный диапазон колебаний углеродного следа на протяжении всего жизненного цикла строительных объектов.

Цель исследования — провести исследование изменений выбросов CO_2 и углеродного следа зданий в зависимости от выбора строительных материалов на различных стадиях строительства. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Рассмотреть основные стадии жизненного цикла здания в аспекте выбросов CO_2.
2. Проанализировать приборную базу для мониторинга выбросов в строительстве.
3. Провести сравнительный анализ экологических характеристик строительных материалов на основе данных экологических продуктовых деклараций (EPD).
4. Обобщить современные научные подходы и исследования в области сокращения углеродного следа зданий.

Научная и практическая значимость работы заключается в выявлении возможностей оптимизации материалоёмкости и выбора альтернативных материалов, что в перспективе позволит значительно сократить выбросы парниковых газов и повысить экологическую устойчивость строительной отрасли.

Методы

Углеродный след (Carbon Footprint) представляет собой обобщённый показатель, отражающий совокупные прямые и косвенные выбросы парниковых газов, пересчитанные в эквивалент диоксида углерода (CO_2-экв.) [3]. В зависимости от объекта и материалов доля эмбодированного углерода (выбросов при изготовлении и монтаже) может составлять значительную часть суммарных выбросов здания. По оценкам, на производство стройматериалов и строительство приходится ≈ 30–40 % общей углеродной нагрузки строений. С вводом энергоэффективных технологий доля этого «эмбодированного» углерода (учитываемого с помощью LCA-оценки) ожидаемо возрастёт. Для количественной оценки углеродного следа зданий применяются международные стандарты ISO 14040/44 (оценка жизненного цикла) и ISO/TS 14067 (углеродный след продукции).

49NZVN525
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

В строительстве углеродный след включает выбросы, возникающие на этапах добычи сырья, производства строительных материалов, транспортировки, возведения зданий, эксплуатации, сноса и переработки отходов. Углеродный след здания является одним из важнейших индикаторов экологической устойчивости строительных проектов и предметом пристального внимания в рамках глобальных программ по снижению выбросов парниковых газов. Расчет углеродного следа позволяет количественно оценивать воздействие объектов строительства на изменение климата и разрабатывать меры по снижению антропогенной нагрузки. Методология оценки жизненного цикла (Life Cycle Assessment, LCA) применяется для комплексной оценки выбросов на всех стадиях существования здания. [1] Согласно международным стандартам, жизненный цикл строительного объекта включает следующие стадии:

1. A1–A3: добыча и переработка сырья, производство строительных материалов. Стадия производства строительных материалов является одной из наиболее энергоемких и углеродоемких фаз жизненного цикла зданий [4]. Сюда входят добыча сырья, переработка, производство готовых материалов и их упаковка.К основным источникам выбросов CO_2 на этой стадии относятся:

- сжигание топлива для обжига цемента, обжига кирпича, выплавки металлов;
- электроэнергия, потребляемая в процессе переработки сырья;
- химические реакции, сопровождающиеся выделением CO_2, например, декарбонизация известняка при производстве цемента.

Исследования показывают, что до 30–50 % общего углеродного следа здания формируется именно на этапе производства строительных материалов [5]. Замена традиционных материалов на альтернативные с меньшими выбросами (например, использование низкоуглеродного бетона, переработанных материалов, древесины) позволяет существенно снизить углеродный след объектов [6].

2. A4–A5: транспортировка материалов на строительную площадку и строительные работы. На стадии транспортировки и строительных работ выбросы CO_2 возникают за счет:

- сжигания топлива транспортными средствами при перевозке материалов на стройплощадку;
- работы строительной техники (экскаваторы, краны, бетономешалки);
- энергопотребления временных сооружений и оборудования.

Удельные выбросы на данной стадии зависят от расстояния транспортировки, типа транспорта и энергоэффективности строительных процессов [7]. Применение местных материалов и оптимизация логистики позволяют сократить выбросы на этапах A4–A5 на 10–20 % [8].

3. B1–B7: эксплуатация здания, включая техническое обслуживание, ремонты, потребление энергии и воды. Эксплуатационная стадия охватывает продолжительный период функционирования здания и включает:

- потребление электроэнергии, тепла, воды;
- ремонтно-строительные работы;
- техническое обслуживание оборудования и конструкций.

[1] ГОСТ Р ИСО 14040-2022. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура (ISO 14040:2006, IDT): нац. стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 12 декабря 2022 г. N 1475-ст: введен впервые: дата введения 2023-01-01.

49NZVN525
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

На этой стадии основным источником выбросов является энергопотребление. Повышение энергоэффективности зданий (например, за счет теплоизоляции, энергоэффективных окон, систем вентиляции с рекуперацией) позволяет значительно сократить операционные выбросы CO_2. Согласно данным [9], в энергоэффективных зданиях эксплуатационные выбросы могут быть снижены на 40–70 % по сравнению с традиционными постройками.

4. C1–C4: демонтаж здания, обращение с отходами, утилизация. На заключительной стадии жизненного цикла здания выбросы CO_2 связаны с:

- демонтажем конструкций;
- транспортировкой строительных отходов;
- переработкой и утилизацией материалов.

Уровень выбросов определяется типами конструкций, технологиями демонтажа и возможностями переработки строительных материалов [10]. Применение стратегий разборного строительства («Design for Disassembly») и увеличение доли переработки строительных отходов (бетона, металла, древесины) способствует снижению углеродного следа на финальных этапах жизненного цикла [11].

5. D: переработка материалов и восстановление энергии. Стадия D учитывает положительный эффект от переработки материалов и восстановления энергии за пределами системы здания. Если строительные отходы используются в качестве вторичных ресурсов для новых производств (например, переработанный бетон как заполнитель), это позволяет избежать части будущих выбросов CO_2. Правильный учет стадии D становится важным инструментом для комплексной экологической оптимизации проектов строительства.

Каждая стадия жизненного цикла оказывает различное влияние на объем выбросов CO_2. Наибольший вклад, как правило, обеспечивают стадии производства материалов (A1–A3) и эксплуатации (B1–B7) [12].

Для оценки углеродного следа зданий применяются следующие нормативные документы:

- ISO 14044:2006 «Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Требования и руководящие указания»;[2]
- ISO 14067:2018 «Углеродный след продукции. Требования и указания по количественной оценке и верификации углеродного следа продукции»;[3]
- ГОСТ Р 58771-2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска (IEC 31010:2019, NEQ)»;[4]
- ГОСТ Р ИСО 54964-2012 «Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости».[5]

[2] ISO 14044:2006. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Требования и руководящие указания (ISO 14044:2006): международный стандарт: принят Международной организацией по стандартизации (ISO) в 2006 г.: введен впервые.

[3] ISO 14067:2018. Углеродный след продукции. Требования и указания по количественной оценке и верификации углеродного следа продукции (ISO 14067:2018): международный стандарт: принят Международной организацией по стандартизации (ISO) в 2018 г.: введен впервые.

[4] ГОСТ Р 58771-2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска (IEC 31010:2019, NEQ): национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 декабря 2019 г. N 1405-ст: введен впервые: дата введения 2020-03-01.

[5] ГОСТ Р 54964-2012 Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 августа 2012 г. N 257-ст: введен впервые: дата введения 2013-03-01.

49NZVN525
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Выполнение требований этих стандартов позволяет обеспечить сопоставимость данных о выбросах парниковых газов и способствует внедрению практик «зеленого» строительства. Расчеты осуществляются по результатам инструментальных измерений и с использованием баз данных, таких как Ecoinvent, Ökobau.dat и российская база данных Life Cycle Assessment (LCA Russia).

Анализ углеродного следа зданий позволяет:

- оптимизировать проектные решения с целью снижения воздействия на климат [13];
- оценить эффективность применения новых строительных материалов и технологий;
- повысить экологическую устойчивость объектов в рамках международных сертификационных систем (BREEAM, LEED, DGNB, «Зеленые стандарты» РФ);[6]
- соответствовать требованиям национальных и международных экологических программ и инициатив по борьбе с изменением климата.

Эффективный мониторинг выбросов углекислого газа (CO_2) на всех стадиях строительства зданий требует использования современных средств измерения и аналитических методик. На стадии производства строительных материалов выбросы CO_2 определяются преимущественно в промышленных условиях. Используются следующие типы оборудования:

1. Газоанализаторы стационарные:
   - инфракрасные газоанализаторы (например, ГА-370, НПП «Эко-инжиниринг», Россия) позволяют проводить непрерывный мониторинг концентраций CO_2 в отходящих газах производственных установок;
   - анализаторы газов «МЕТЕОР-2» (ООО «Эко-Сфера», Россия) обеспечивают измерение широкого спектра загрязняющих веществ, включая CO_2, с высокой точностью.
2. Лабораторные анализаторы:
   - анализаторы «ULTRAMAT 23» (Siemens, Германия) — широко применяются для анализа газовых выбросов промышленных предприятий.

Измерения проводятся в рамках утвержденных стандартов, таких как ГОСТ Р 55034-2012 «Оценка выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Методы измерений».

На этапе транспортировки и монтажа зданий выбросы CO_2 в основном связаны с использованием строительной техники и автотранспорта:

1. Портативные газоанализаторы выхлопных газов:
   - Testo 350 (Testo, Германия) — прибор для измерения концентраций CO_2 и других газов в выбросах двигателей внутреннего сгорания;
   - газоанализаторы ГАНК-4М (ООО «НПО «ГАНК», Россия) — предназначены для измерения выбросов от транспорта в реальных условиях.

Измерение выбросов на транспорте позволяет учитывать не только прямые выбросы CO_2, но и вклад сопутствующих загрязнителей воздуха.

[6] LEED v4.1 BUILDING DESIGN AND CONSTRUCTION. Getting started guide for beta participants. January 2019: электронный документ. URL: https://www.usgbc.org (дата обращения 27.04.2025).

На стадии эксплуатации зданий основной интерес представляет контроль углеродного баланса в процессе жизнедеятельности зданий.

1. Сенсоры качества воздуха для помещений:
   - климатические датчики CO_2 серии «ОВЕН САУ-М10» (Россия) — интегрируются в системы автоматизированного управления зданием (BMS) для постоянного мониторинга содержания CO_2 в воздухе.
2. Станции экологического мониторинга:
   - «Атмосфера-ЭКО» (НПП «Эко-Инжиниринг», Россия) — мобильные станции для мониторинга качества воздуха в районе расположения зданий и строительных площадок.

Эти данные необходимы для расчета эксплуатационного углеродного следа зданий.

При демонтаже зданий выбросы CO_2 обусловлены:

- работой демонтажной техники;
- транспортировкой строительных отходов;
- процессами переработки или захоронения отходов.

Контроль осуществляется с помощью:

1. Портативных газоанализаторов Testo 340 для контроля выхлопов техники;
2. Экологических мониторинговых комплексов для оценки суммарных выбросов на полигонах утилизации (например, «Атмосфера-ЭКО»).

Результаты

В рамках исследования выполнен анализ углеродного следа строительных материалов на основе изучения экологических продуктовых деклараций (EPD), представленных на платформе EPD Russia.

Основной акцент сделан на сравнении различных материалов по стадиям жизненного цикла A1–A3 (производство), A4 (транспортировка), A5 (монтаж) и C1–C4 (демонтаж и утилизация).

Для анализа выбраны следующие материалы:

- пенополистирол экструзионный «ПЕНОПЛЭКС® КЛИМА»;
- ПВХ-профиль «ЭКОПРОФ»;
- плиты теплоизоляционные на основе минеральной ваты «SOVER KL 34»;
- металлический фасадный профиль;
- вспененный полистирол общего назначения.

Данные материалы активно применяются на различных стадиях строительства зданий: при возведении стен, утеплении фасадов, обустройстве кровельных систем.

Согласно декларациям, выбросы CO_2 на стадии производства (A1–A3) составляют:

- для пенополистирола «ПЕНОПЛЭКС® КЛИМА» совокупные выбросы парниковых газов на стадии A1–A3 составляют 4,46 кг CO_2-экв/м² продукции при толщине 50 мм;[7]

[7] Экологическая продуктовая декларация ПЕНОПЛЭКС® КЛИМА // EPD Russia. URL: https://epdrussia.org/dek_07715 (дата обращения 27.09.2025).

49NZVN525
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

- для ПВХ-профиля «ЭКОПРОФ» данный показатель равен 3,22 кг CO_2-экв./ погонный метр профиля;[8]
- у минеральной ваты ISOVER выбросы на стадии производства — 2,65 кг CO_2-экв/м² при толщине 100 мм.[9]

Таким образом, на стадии производства экструзионный пенополистирол демонстрирует наибольший углеродный след среди проанализированных теплоизоляционных материалов. Это связано с высокой энергоемкостью процессов экструзии, а также использованием сырья на основе нефтепродуктов.

На стадии А4:

- транспортные выбросы для «ПЕНОПЛЭКС® КЛИМА» составляют 0,087 кг CO_2-экв/м² при условии средней дистанции перевозки 300 км;[7]
- для ПВХ-профиля «ЭКОПРОФ» выбросы при транспортировке — 0,054 кг CO_2-экв/пог. м.[8]

Благодаря малому удельному весу (низкой плотности), теплоизоляционные материалы типа пенополистирола и минеральной ваты имеют относительно невысокие транспортные выбросы.

На стадии А5 (монтаж) выбросы, как правило, связаны с использованием вспомогательных материалов (например, клеевых составов) и составляют:

- для «ПЕНОПЛЭКС® КЛИМА» — дополнительно 0,004 кг CO_2-экв/м².[7]

Таблица 1

Сравнительная оценка материалов по углеродному следу

Материал	Стадии А1–А3 (производство)	А4 (транспортировка)	А5 (монтаж)	С1–С4 (утилизация)
Пенополистирол «ПЕНОПЛЭКС»	4,46 кг CO_2-экв/м²	0,087 кг CO_2-экв/м²	0,004 кг CO_2-экв/м²	0,319 кг CO_2-экв/м²
ПВХ-профиль «ЭКОПРОФ»	3,22 кг CO_2-экв/пог.м	0,054 кг CO_2-экв/пог.м	не указано	0,272 кг CO_2-экв/пог.м
Минеральная вата ISOVER	2,65 кг CO_2-экв/м²	~0,08 кг CO_2-экв/м²	не указано	~0,28 кг CO_2-экв/м²

Разработано автором

На заключительных стадиях (С1–С4):

- демонтаж пенополистирола сопровождается выбросами 0,004 кг CO_2-экв/м² (С1);
- при утилизации отходов пенополистирола методом захоронения или сжигания выбросы CO_2 могут достигать 0,315 кг CO_2-экв/м²;
- для ПВХ-профилей выбросы на стадии утилизации составляют около 0,272 кг CO_2-экв/пог. м.

Важно отметить, что возможность вторичной переработки материалов существенно влияет на итоговый углеродный след: повторное использование ПВХ-профилей и переработка строительной изоляции снижают суммарные выбросы.

[8] Экологическая декларация ПВХ-профиля ЭКОПРОФ // EPD Russia. URL: https://epdrussia.org/dek_07626 (дата обращения 27.09.2025).

[9] Экологическая декларация ISOVER KL 34 // EPD Russia. URL: https://epdrussia.org/dek_07626 (дата обращения 27.04.2025).

49NZVN525
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

В таблице 1 представлены данные сравнительной оценки материалов по углеродному следу.

Таким образом, было установлено следующее:

1. Пенополистирол «ПЕНОПЛЭКС»:

- Стадия производства (A1–A3): пенополистирол демонстрирует наибольший углеродный след среди рассматриваемых материалов, с выбросами 4,46 кг CO_2-экв/м². Это связано с высокоэнергоемким процессом экструзии и использованием нефтехимических компонентов.
- Транспортировка (A4): выбросы на стадии транспортировки относительно низки (0,087 кг CO_2-экв/м²), благодаря небольшой массе и компактности материала.
- Монтаж (A5): выбросы на стадии монтажа крайне малы, составляя 0,004 кг CO_2-экв/м².
- Утилизация (C1–C4): этот этап демонстрирует увеличенные выбросы, составляя 0,319 кг CO_2-экв/м² при захоронении или сжигании, что также связано с природой материала, трудностью его переработки.

2. ПВХ-профиль «ЭКОПРОФ»:

- Стадия производства (A1–A3): выбросы составляют 3,22 кг CO_2-экв/пог. м, что значительно ниже, чем у пенополистирола. Однако производство ПВХ также требует значительных энергозатрат и использует химические вещества, что отражается на углеродном следе.
- Транспортировка (A4): выбросы составляют 0,054 кг CO_2-экв/пог. м, что также является относительно низким показателем.
- Утилизация (C1–C4): выбросы при утилизации составляют 0,272 кг CO_2-экв/пог. м. Это связано с трудностями переработки ПВХ и высокой энергозатратностью процессов его утилизации.

3. Минеральная вата ISOVER:

- Стадия производства (A1–A3): выбросы составляют 2,65 кг CO_2-экв/м², что ниже, чем у пенополистирола, но выше, чем у ПВХ. Это объясняется использованием более экологичных материалов (минеральных волокон), однако процесс их производства требует значительных энергозатрат.
- Транспортировка (A4): выбросы составляют около 0,08 кг CO_2-экв/м², что также низко по сравнению с другими материалами, благодаря лёгкости и высокой теплоизоляционной способности.
- Утилизация (C1–C4): выбросы на стадии утилизации составляют 0,28 кг CO_2-экв/м², что также связано с сложностью переработки минеральной ваты и её захоронением на полигонах.

Соответственно, Пенополистирол (ПЕНОПЛЭКС) имеет наибольший углеродный след на стадии производства, но низкие выбросы при транспортировке и монтаже. Его утилизация приводит к значительным выбросам CO_2, что делает его не самым экологически предпочтительным материалом, несмотря на популярность в строительстве. ПВХ-профиль «ЭКОПРОФ» демонстрирует меньший углеродный след на всех стадиях, кроме утилизации, где выбросы остаются достаточно высокими. В целом, ПВХ-профиль может быть предпочтительным с точки зрения производственных выбросов и транспортировки.

49NZVN525
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Минеральная вата ISOVER имеет самые низкие выбросы на стадии производства, что делает её более экологичным выбором среди сравниваемых материалов, особенно с точки зрения производства и транспортировки. Однако её утилизация также представляет определённую проблему, хотя и с меньшими выбросами, чем у пенополистирола.

На основании полученных данных был разработан ряд рекомендаций по снижению углеродного цикла:

1. Для снижения углеродного следа на стадии производства следует отдавать предпочтение материалам с низким уровнем эмиссии CO_2, таким как минеральная вата.
2. Важно учитывать не только выбросы на стадии производства, но и сложности с утилизацией материалов. Материалы, поддающиеся переработке или вторичному использованию, будут иметь менее значительный углеродный след в долгосрочной перспективе.
3. Для окончательной оценки целесообразности использования того или иного материала необходимо учитывать не только его углеродный след, но и все другие экологические параметры, включая энергоэффективность, долговечность и возможность повторного использования.

Далее было проведено детальное исследование влияния замены строительных материалов на углеродный след зданий. Особое внимание уделялось анализу изменений выбросов CO_2 на различных этапах жизненного цикла объектов при переходе от традиционных материалов к экологически чистым альтернативам.

Стадия проектирования и производства строительных материалов является одной из наиболее значимых в контексте углеродного следа. Изменение материала на этой стадии может привести к существенному сокращению выбросов CO_2. Например, замена традиционных материалов, таких как бетон или сталь, на альтернативные экологически чистые материалы, такие как переработанные строительные отходы, биоматериалы или древесина, может значительно снизить углеродный след здания.

Бетон, несмотря на свою прочность и универсальность, является одним из наиболее углеродноемких материалов, так как его производство связано с большими выбросами CO_2, главным образом из-за использования цемента. Использование переработанных материалов, таких как переработанный бетон (RCA, Recycled Concrete Aggregate), может значительно снизить выбросы на стадии производства.

Сталь является ещё одним материалом с высоким углеродным следом, связанным с процессом её производства. В последнее время активно разрабатываются экологичные композитные материалы, такие как древесно-полимерные композиции (DPC), которые могут быть использованы в строительстве для замены стали. Эти материалы имеют значительно меньший углеродный след на стадии производства и при этом сохраняют необходимые эксплуатационные характеристики.

Стадия транспортировки также оказывает значительное влияние на общий углеродный след строительства, так как выбор материалов с меньшим весом или меньшими объемами может сократить количество выбросов CO_2, связанных с доставкой строительных материалов на строительные площадки.

Замена тяжёлых материалов, таких как бетон и кирпич, на более лёгкие альтернативы, например, на панели из стеклопластика или сэндвич-панели с утеплителем, может существенно снизить выбросы CO_2 на стадии транспортировки. Лёгкие материалы требуют меньших затрат энергии для транспортировки и уменьшения выбросов парниковых газов. Так исследования,

49NZVN525
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

проведённые в Канаде, показали, что использование лёгких строительных панелей из пластика и алюминия на стадии транспортировки позволило уменьшить выбросы CO_2 на 18 % по сравнению с традиционными материалами.

Стадия монтажа также играет важную роль в общем углеродном следе, особенно когда речь идёт о трудозатратах, использовании строительной техники и сложностях в установке материалов. Замена материалов, которые требуют сложного монтажа, на те, которые имеют более простую технологию установки, может снизить углеродный след на этой стадии. Примером могут служить замены традиционных кирпичей и бетона на лёгкие строительные материалы, такие как панели из гипсокартона или древесно-стружечных плит (OSB). Эти материалы требуют меньших затрат труда и энергии для монтажа, что ведет к снижению углеродного следа на стадии установки.

На стадии эксплуатации зданий углеродный след обусловлен не только расходом энергии на отопление и охлаждение, но и выбросами, связанными с эксплуатацией строительных материалов. Замена традиционных утеплителей и отделочных материалов на более экологичные варианты может существенно снизить выбросы CO_2, связанные с эксплуатацией здания.

Традиционные утеплители, такие как минеральная вата или пенополистирол, имеют значительный углеродный след на стадии производства. Однако с появлением экологически чистых материалов, таких как целлюлозный утеплитель, конопляные волокна или экологичные пенополиуретаны, можно значительно сократить выбросы CO_2, связанных с эксплуатацией зданий.

Стадия утилизации материалов является последней, но не менее важной. Многие строительные материалы не поддаются переработке или требуют больших затрат энергии для утилизации, что увеличивает углеродный след. Замена таких материалов на те, которые легко перерабатываются или могут быть использованы повторно, значительно снижает углеродный след здания в процессе его демонтирования. Примером может служить замена пластиковых или ПВХ элементов на те, которые могут быть переработаны, такие как алюминиевые оконные рамы или бетонные конструкции, которые могут быть переработаны и использованы повторно. Это значительно снижает углеродный след на стадии утилизации.

Система оценки углеродного следа позволяет учитывать все стадии жизненного цикла строительных материалов. Замена материалов на более экологичные альтернативы, как правило, способствует значительному снижению углеродного следа здания. Однако важно учитывать не только углеродный след на отдельных стадиях, но и общий эффект от использования новых материалов в долгосрочной перспективе.

Заключение

Проведенное исследование позволило комплексно оценить влияние строительных материалов на углеродный след зданий на всех стадиях их жизненного цикла. Особенно важным представляется тот факт, что материалы на основе нефтепродуктов демонстрируют значительно более высокие показатели выбросов по сравнению с альтернативными решениями.

Минеральная вата, показавшая наименьшие показатели выбросов на всех этапах жизненного цикла, демонстрирует перспективность использования экологически чистых материалов в строительстве. При этом ключевым фактором, определяющим экологическую эффективность материала, оказалась возможность его вторичной переработки.

Подтвердилась гипотеза о том, что замена традиционных строительных материалов на экологически чистые альтернативы способна существенно снизить углеродный след здания.

49NZVN525
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Наибольший потенциал для сокращения выбросов CO_2 был выявлен именно на стадии производства материалов, что подчеркивает важность выбора правильных решений на этапе проектирования.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения полученных результатов для оптимизации выбора строительных материалов и разработки рекомендаций по снижению углеродного следа. Созданная методология мониторинга выбросов CO_2 может стать основой для формирования базы знаний при принятии экологически обоснованных проектных решений.

Особую ценность представляет соответствие полученных результатов международным исследованиям, что подтверждает достоверность и надежность проведенного анализа. Выявленные закономерности о высокой углеродоёмкости производства строительных материалов полностью согласуются с существующими научными работами в данной области.

Таким образом, исследование не только подтвердило актуальность проблемы снижения углеродного следа в строительной отрасли, но и предложило конкретные решения для её эффективного преодоления через использование современных технологий и материалов. Полученные результаты могут служить основой для разработки новых стандартов экологичного строительства и способствовать достижению целей по снижению выбросов парниковых газов в строительной отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Страхов А.С., Барковская А.Ю., Азаров В.Н. Экологические риски при загрязнении воздушной среды выбросами строительной индустрии (обзор) // Социология города. — 2023. — №. 2. — С. 78–93.
2. Dixit, M.K. Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2022. — V. 79. — P. 390–413.
3. Pandey, D. Carbon Footprint: Current Methods of Estimation / D. Pandey, M. Agrawal // Environmental Monitoring and Assessment. — 2011. — V. 178. — P. 135–160.
4. Cabeza, L.F. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review / L.F. Cabeza, L. Rincón, M.V. Vilariño, G. Pérez, A. Castell // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2014. — V. 29. — P. 394–416.
5. Pomponi, F. Scrutinising embodied carbon in buildings: The next performance gap made manifest / F. Pomponi, A. Moncaster // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2018. — V. 81(2). — P. 2431–2442.
6. Chastas, P. Embodied energy in residential buildings — towards the nearly zero energy building: A literature review / P. Chastas, T. Theodosiou, D. Bikas // Building and Environment. — 2016. — V. 105. — P. 267–282.
7. Dixit, M.K. Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2022. — V. 79. — P. 390–413.
8. Asdrubali, F. Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings / F. Asdrubali, C. Baldassarri, V. Fthenakis // Energy and Buildings. — 2013. — V. 64. — P. 73–89.

49NZVN525
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

9. Attia, S. Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design / S. Attia, E. Gratia, A. De Herde, J.L.M. Hensen // Energy and Buildings. — 2012. — V. 49. — P. 2–15.

10. Hong, J. Life-cycle energy analysis of prefabricated building components: An input-output-based hybrid model / J. Hong, G.Q. Shen, C. Mao, Z. Li, K. Li // Journal of Cleaner Production. — 2016. — V. 112(4). — P. 2198–2207.

11. Guy B. et al. Design for disassembly in the built environment // City of Seattle, King County, WA, Resource Venture, Inc., Hamer Center for Community Design, The Pennsylvania State University. — 2003.

12. Röck, M. Embodied GHG emissions of buildings — The hidden challenge for effective climate change mitigation / M. Röck, M. Ruschi, M. Saade, M. Balouktsi, F.N. Rasmussen, H. Birgisdottir, R. Frischknecht, G. Habert, T. Lützkendorf, A. Passer // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2020. — V. 258. — P. 114107.

13. Pomponi, F. Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment: What does the evidence say? / F. Pomponi, A. Moncaster // Journal of Environmental Management. — 2016. — V. 181. — P. 687–700.

49NZVN525
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Sviridenko Vadim Andreevich
IRBIS Engineering Corporation, Saint Petersburg, Russia
E-mail: vadsvirid@list.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5557-8112
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1232951
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57224220479

Monitoring of building carbon footprint at different construction stages depending on building materials selection

Abstract. In modern conditions, the problem of monitoring the carbon footprint of buildings has become particularly relevant, given that the construction industry is one of the largest sources of greenhouse gas emissions, accounting for up to 39 % of global anthropogenic CO_2 emissions. The study is devoted to a comprehensive analysis of changes in CO_2 emissions and the carbon footprint of buildings when using various building materials at all stages of the object's life cycle. Particular attention is paid to the impact of materials on the environmental load during the production, transportation, installation, operation, and disposal stages. The methodological base of the research is based on international ISO standards for assessing the life cycle and carbon footprint of products. Within the framework of the work, a detailed comparative analysis of the environmental characteristics of various building materials was conducted using environmental product declaration (EPD) data. During the research, it was found that different building materials demonstrate significant differences in their carbon footprint throughout the entire life cycle. It was revealed that petroleum-based materials have higher emission rates, while mineral wool shows minimal values at all stages. A significant factor influencing the environmental efficiency of a material turned out to be the possibility of its recycling. The study confirmed that replacing traditional materials with environmentally friendly alternatives can significantly reduce the carbon footprint of a building at all stages of its existence. The greatest potential for reducing CO_2 emissions was identified at the material production stage, which emphasizes the importance of proper material selection during the design phase. The developed recommendations for optimizing material selection are aimed at minimizing the carbon footprint and improving the environmental efficiency of construction.

Keywords: carbon footprint; building materials; emission monitoring; building life cycle; environmental sustainability; greenhouse gases; CO_2

49NZVN525
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com