

Review Article

Received: May 30, 2022

Accepted: August 03, 2022

Published: August 09, 2022

ISSN 2658-5553

Software for carbon dioxide emissions in construction. A review

Mikhaylovskaya, Liudmila Andreevna ^{1*}Nemova, Darya Viktorovna ¹Antonova, Daria Andreevna ¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; lamikhaylovskaya@gmail.com (M.L.A.); nemova_dv@spbstu.ru (N.D.V.); cool.usaru@yandex.ru (A.D.A.)

*Correspondence: email lamikhaylovskaya@gmail.com

Keywords:

Carbon dioxide emissions; Energy efficiency of design solutions; Energy-efficiency; Building materials; Renovation

Abstract:

The object of research. A comparative analysis of software that allows the carbon footprint of a projected building to be determined at an early stage in terms of functionality has been carried out. A description of the software and services under consideration and their advantages are given. Carbon emissions for the building envelope of the building under renovation are assessed. A recommendation is made for a rational combination of building envelope layers with minimal impact on the environment. **Results.** It was revealed that the emission readings of the same material may differ by a factor of 2 to 3 depending on the composition, additives, manufacturer and combination of the structure. The use of energy-efficiency materials is one of the keys to a sustainable system.

1 Introduction / Введение

Углеродный след - индикатор воздействия на климатическую систему [1].

На протяжении всего жизненного цикла здание оставляет за собой углеродный след от выбросов углекислого газа, образованных в результате определенной деятельности человека или предприятия прямо или косвенно. Углеродный след объекта показывает количество парниковых газов, выбрасываемых в результате деятельности такого объекта.

Ежегодно выброс парниковых газов зданиями составляет 39% глобальных выбросов парниковых газов, 28% от эксплуатационных выбросов, от энергии, необходимой для их обогрева, охлаждения и питания, и оставшиеся 11% от материалов и строительства [2], [3]. 80% потребления энергии происходит на этапе эксплуатации здания, а не на этапе строительства [4]. Если провести оценку на ранней стадии проектирования, можно значительно снизить углеродный след от здания [5], [6].

Таким образом, чтобы снизить воздействие реализуемого проекта на климат, необходимо уже в первых эскизах оптимизировать выбросы и стремиться к устойчивой системе. Также необходимо по возможности использовать и реконструировать уже имеющиеся здания.

Благодаря рациональному выбору строительных материалов, типов конструкций, оптимизации объема и ориентации можно создать углеродно-нейтральные здания с низким энергопотреблением, где необходимая энергия поставляется из возобновляемых источников.

С 2015 года, когда было достигнуто Парижское соглашение по климату, стали востребованы сервисы для расчета углеродного следа, так как с их помощью каждый этап проекта может быть учтен и сбалансирован. Важно обеспечить сохранение качества конструкций здания на протяжении всего жизненного цикла [7]. Это означает, что необходимо учитывать различные технические и функциональные характеристики продуктов и материалов, используемых при его строительстве.



Самый эффективный путь к достижению такого нового уровня строительства зданий с высокими эксплуатационными характеристиками — учет углеродного следа на ранних этапах проектирования. Благодаря тому что эксперты строительной отрасли продвигаются вперед в данном направлении и создают технологии позволяющие заранее оценить и снизить количество выбросов CO₂, мы уже имеем инструменты для достижения этой цели [8].

Таким образом цель исследования состоит в проведении сравнительного анализа и обзора сервисов, позволяющих рассчитать углеродный след на ранней стадии проектирования. А также выбор ограждающей конструкции в реконструируемом здании с оптимальной теплоотдачей при минимальном вредном воздействии на окружающую среду.

2 Energy modelling software/ Программное обеспечение для моделирования энергопотребления

Вопросы повышения энергоэффективности строительства зданий с помощью оптимизации ограждающих конструкций широко освещены в научной литературе [9]–[12]. На сегодняшний день существует множество алгоритмов, сервисов и вариантов программного обеспечения, которые позволяют быстро рассчитать энергетическую эффективность различных вариантов конструктивных решений зданий на всех этапах жизненного цикла [13]–[20]. В их расчет так же вложены характеристики выделяемого углеродного следа. Основная методология программ заключается в использовании их проектировщиками: они смогут заранее оценить влияние тех или иных материалов на окружающую среду и продумать различные сценарии их использования.

Ниже представлена информация по шести наиболее доступным сервисам, позволяющим произвести расчет углеродного следа. Помимо них, разработаны также следующие программные продукты: итальянская Ediclimate EC700 [21], французская COMFIE [22], австралийская FirstRate5 [23], ISL [24], TRNSYS [25], analysys.tool [26], eQuest [27], IDA ICE [28].

Green Building Studio Autodesk [29], [30] - наиболее распространенный онлайн- сервис, позволяющий на концептуальной стадии проектирования осуществлять расчеты, связанные с эксплуатацией здания, оптимизируя использование энергии и нейтрализацию выбросов углекислого газа.

Результаты по энергии и выбросам углерода отображаются на вкладке проекта и разделены на небольшие группы. Углеродно-нейтральный потенциал измеряет ежегодные выбросы CO₂ в рамках рассматриваемого проекта, включая электроэнергию и выбросы топлива. Представлена краткая информация об использовании энергии и ресурсов здания, выбросах углерода, допущениях моделирования, показателях производительности и затратах. Также представлены рекомендации по снижению углеродных выбросов. Программа самостоятельно рассматривает наиболее энергоэффективное экономически целесообразные варианты [30].

Примечательно, что Green Building Studio может предложить заменить, предложенные по умолчанию коммунальные услуги местных поставщиков, а также предложить возобновляемые источники, такие как солнечная энергия (фотоэлектрический потенциал) и потенциал энергии ветра.

Сервис полностью англоязычный, интерфейс достаточно сложен для использования впервые, но понятен в освоении.

Инструмент Graphisoft EcoDesigner [31], интегрированный в программу архитектурно-строительного проектирования ArchiCAD, позволяет произвести энергетические расчеты на начальной стадии работы над проектом. Его сертифицированный механизм расчета выполняет динамическую оценку энергопотребления здания, предоставляя информацию о годовом потреблении энергии проекта, углеродном следе и ежемесячном энергетическом балансе. Помимо информации о выбросах углекислого газа в результате эксплуатации здания в течение года, он выводит величину эквивалентного поглощения его растительностью, которая отображается при оценке энергетического баланса под круговой диаграммой. После производимого расчета может быть разработана стратегия сокращения выбросов, например, с помощью технологических разработок или стратегий потребления, путем разработки альтернативных проектов, таких как солнечная или ветровая энергетика. Инструмент не дает конкретных детализаций, но с удобным русскоязычным интерфейсом.

One Click LCA [32] программное обеспечение, разработанное компанией Trimble, предоставляемое в виде плагина для Revit Autodesk и встроено в Tekla Building Information



Modeling для оценки жизненного цикла и создания экологической декларации продукции для строительной отрасли. Позволяет рассчитывать углеродный след на различных этапах проектирования и реализации.

Плагин в Revit работает, как калькулятор, учитывающий архитектурную форму и настройку материалов. Позволяет учитывать количество выбросов, но не дает практических рекомендаций, имеет простой для освоения интерфейс на английском языке.

В сотрудничестве с Tekla софт встроен в функционал программы и облегчает проектирование и строительство низкоуглеродистых конструкций. В большей степени направлена на упрощение процесса использования материала с оценкой углерода в различных вариациях конструкций. При проектировании офисного здания в Бельгии с помощью данного сервиса было исследовано воздействие на окружающую среду различных строительных систем [33], [34].

CarbonFixer [35] инструмент, разработанный канадской компанией Quebec Wood Export Bureau совместно с консалтинговой компанией Brainpool, позволяет рассчитать уровень выбросов углерода для будущих зданий на раннем этапе проектирования. Выпускается в виде плагина для Revit Autodesk. Помимо расчетов парниковых газов, предлагает сравнение используемых традиционного бетона и стали в подобных сценариях с древесиной и строительными материалами из биоресурсов, которые потребляют гораздо меньше энергии. Также Offsite Wood предлагают веб-приложение CarbonFixers, которое сравнивает различные варианты проекта и предоставляет рекомендации реализации из более экологичных строительных материалов. Все инструменты предоставляются на английском языке и бесплатно.

DesignBuilder [36] программа позволяющая осуществить расчеты в EnergyPlus и глобально проанализировать выделяемый углеродный след с точки зрения энергозатратности и экономичности. Предоставляет XSMML отчеты с гистограммами выбросов и поглощения углерода. Определяет наиболее влиятельные факторы, влияющие на потребление энергии. Сложна в освоении, но при этом многофункциональна. В исследовании [37], посвященном подбору ограждающих конструкций для жилых зданий в холодных районах Китая с помощью программы DesignBuilder, показаны результаты улучшения энергосбережения на 33%. В статье [38] описано достижение показателей нулевого потребления энергии в здании, используя программу DesignBuilder. Исследование [39], проведенное с помощью данной программы позволяет сделать выводы о потреблении энергии и выбросов углерода при использовании разных систем отопления.

Embodied Carbon in Construction Calculator (EC3) [40] - калькулятор открытого доступа, который позволяет проводить бенчмаркинг, оценку и сокращение переработанного углерода, ориентируясь на первоначальные выбросы строительных материалов в цепочке поставок. Позволяет оценивать по спецификации проекта, а также BIM-модели с базой материалов. Основываясь на этих данных, инструмент EC3 позволяет определять и реализовывать низкоуглеродистые варианты. Калькулятор EC3 предназначен в первую очередь для проектировщиков: они смогут заранее оценить влияние тех или иных материалов на окружающую среду и продумать различные сценарии их использования. Компания Skanska, которая уже тестирует эту программу, заявила, что с помощью EC3 ей удалось сократить количество выбросов углерода на 30%. Причем на затратах на строительство это практически не отразилось. Интерфейс англоязычен очень прост в использовании и на данном этапе тестируется бесплатная бета-версия.

Для более комплексного сравнения была составлена сравнительная Таблица 1, включающая в себя данные о функциональных возможностях каждого рассматриваемого программного обеспечения.

Так, целью каждого программного обеспечения является сокращение выбросов от материалов и энергии на протяжении всего жизненного цикла объекта и соблюсти баланс. Оценка жизненного цикла применяется в строительном секторе с 1990-х годов [41], [42]. Проведение углеродного анализа на раннем этапе в качестве прогнозной информации для проекта может помочь с выбором качественных материалов, проектированию энерго-экономичных архитектурных форм, расчету экологических инженерных систем [43].



Таблица 1. Сравнительный анализ программного обеспечения
Table 1. A comparative analysis of software

Параметры	Green Building Studio Autodesk	ArchiCAD (Graphisoft EcoDesigner)	Trimble Tekla BIM (One Click LCA)	Carbon Fixer	Design Builder	EmbodiedCarbon in Construction Calculator
Предложения использования альтернативных строительных материалов	+	-	+	+	-	+
Предложения использования возобновляемых источников	+	-	-	+	-	-
Возможность расчета в соответствии с LEED, BREEAM	+	+	+	+	+	+
Анализ Экономических показателей	+	-	+	-	+	-
Использование совместной работы	+	-	+	+	-	-
Предоставление пробного периода	+	+	+	-	+	Бета-версия
Цена	Бесплатно с подпиской Autodesk (2400 \$/год)	1800 \$/год	Бесплатно	Бесплатно	1650 \$/год	Бесплатно

Новые высокопроизводительные здания по сравнению с обширным фондом существующих зданий составляют лишь небольшую долю от строительного фонда [44]. Поэтому, помимо нового строительства, где уже применяют новые стандарты и уделяют должное внимание заботе об окружающей среде, деятельность строительного сектора все больше смещается в сторону реконструкции зданий, переоборудование и модернизацию существующих зданий [45]–[49]. Под экологичностью строительства, также понимают не разрушение имеющихся зданий, а их модернизацию с применением энергоэффективных и экологически целесообразных мероприятий [50]–[58]. Существующие здания потребляют много энергии. Можно отметить скачок роста внимания к теме модернизации зданий в целях повышения энергоэффективности и снижения выбросов углекислого газа с 2017 года [59], [60]. Так, в исследовании реконструкции ограждающих конструкций жилых домов в Дании показана возможность значительного снижения выбросов CO₂



и экономии 50% энергии [61]. В аналогичном исследовании [62] для офисного здания приводятся данные о снижении потребления энергии на 24% и ежегодных выбросов углерода на 19% при реконструкции при сравнении стратегий модернизации. Согласно исследованию [63], изоляция стены и крыши, герметичность и замена окон оказывают наибольшее влияние на энергосбережение и позволяют сократить 45% общего годового потребления энергии.

3 Facade refurbishment/ Реконструкция фасада

Использование технологии BIM стремительно распространяется с начала 2000-х годов по всему миру для предварительного планирования, проектирования, строительства зданий и инфраструктуры. Но с недавнего времени акцент в исследованиях смещается с более ранних этапов жизненного цикла на эксплуатационно-техническое обслуживание, восстановление, разборку и вопросы, связанные с окончанием срока службы особенно для сложных объектов [64]. В последние годы научным сообществом осознается необходимость выйти за рамки оценки энергии и перейти к экологической оценке в перспективе жизненного цикла путем сопоставления воздействия, оказываемого строительными материалами и устройствами для производства энергии [65]–[69]. Для того чтобы снизить углеродный след в условиях реконструкции, нужно выбрать ограждающую конструкцию с максимальной теплоотдачей при минимальном вредном воздействии на окружающую среду [70]–[74]. Фасад является одним из важнейших направлений работ по реконструкции зданий. Теплоизоляционные материалы играют важную роль в решении проблемы зданий с нулевым энергопотреблением благодаря их потенциалу в плане сокращения спроса на энергию в зданиях и выбросов углерода [75]–[82]. Однако увеличение толщины изоляционного материала в оболочке здания имеет последствия с точки зрения энергии, окружающей среды и экономики.[83], [84] Следует предпринять усилия по оптимизации толщины изоляции, с тем чтобы сбалансировать все эти аспекты. Так, для административного здания 1960-х годов постройки, реконструируемого в г. Оренбурге, было предложено несколько оболочек конструкций из материалов, используемых наиболее часто, а также несущего слоя реконструируемого здания, представленного силикатным кирпичом. Варианты ограждающих конструкций отображены в Таблице 2 и на Рис. 1.

Таблица 2. Типы ограждающих конструкций
Table 2. Types of enclosing structures

Тип	Несущий слой	Утеплитель	Облицовка
1	Силикатный кирпич	XPS плиты	Декоративная штукатурка
2	Силикатный кирпич	PIR плиты	Декоративная штукатурка
3	Силикатный кирпич	Аэрогель на основе стеклохолста	Декоративная штукатурка
4	Силикатный кирпич	XPS плиты	Глиняный кирпич
5	Силикатный кирпич	PIR плиты	Глиняный кирпич
6	Силикатный кирпич	Аэрогель на основе стеклохолста	Глиняный кирпич

Основной особенностью современного силикатного кирпича является его экологические показатели: он не содержит формальдегид и углеводородные соединения, этот показатель полностью исключает эмиссию токсичных элементов. На сегодняшний день теплопроводные свойства кирпичной стены толщиной в два кирпича не соответствуют требованиям строительных норм и правил. Поэтому должна быть выполнена многослойная стенка оболочки, отвечающая экологическим и энергоэффективным требованиям.

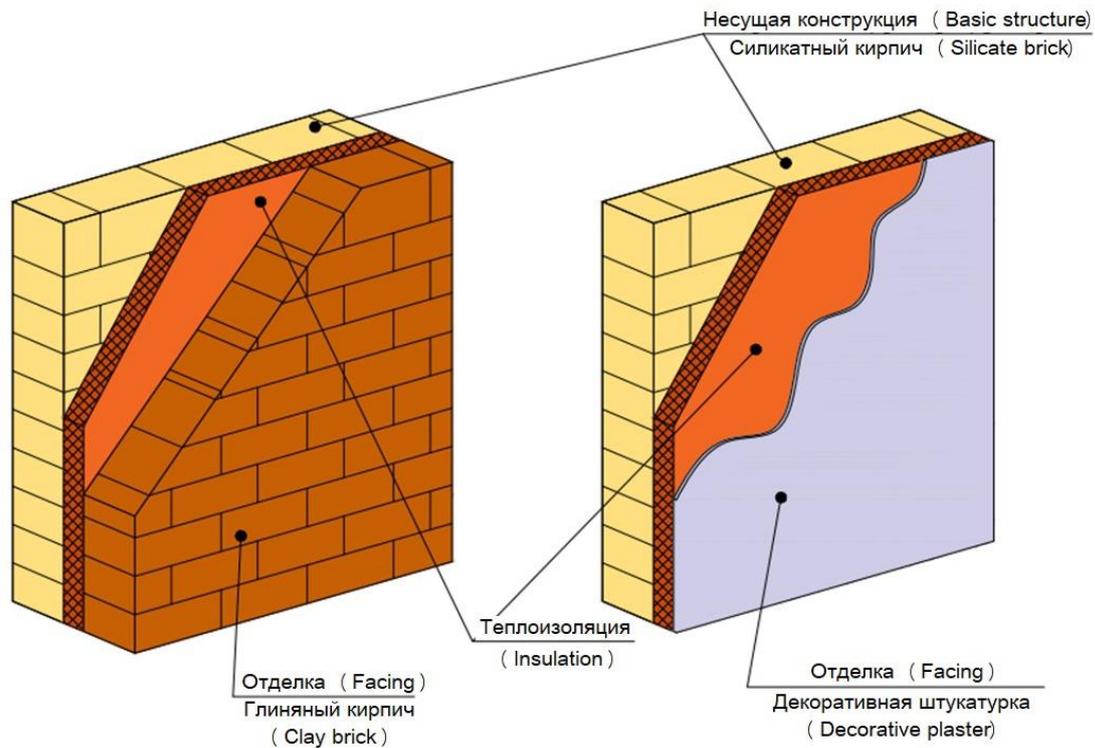


Рис. 1. Структура рассматриваемых конструкций
Fig. 1. The framework of the considered structures

В качестве изоляции и были рассмотрены новейшие и наиболее эффективные материалы, на сегодняшний день: XPS плиты (экструдированный пенополистирол)[85] и PIR изоляция (на основе пенополиизоцианурата), а также аэрогель [86], [87].

Для того, чтобы решить проблему сокращения углеродного следа при реконструкции, особое внимание стоит уделить выбору строительных материалов. Однако следует иметь в виду, что при выборе производственной низкой энергии может увеличиться эксплуатационное энергопотребление, и наоборот [88]. В разделе декларации о товаре можно найти свойства о характере воздействия материалов на окружающую среду.

Характеристики материалов представлены в Таблице 3.

Таблица 3. Теплофизические характеристики материала
Table 3. Thermophysical characteristics of the material

Материал	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Теплоемкость, Дж/(кг·°С)
Силикатный кирпич	1500	0,88	880
Глиняный кирпич (облицовочный)	1300	0,48	880
Декоративная штукатурка	1500	0,87	840
XPS плиты	33,7	0,034	1340
PIR плиты	33	0,023	1610
Аэрогель на основе стеклохолста	180	0,017	430

4 Results and Discussion

Чтобы оценить ограждающую конструкцию с учетом негативного воздействия сооружения на окружающую среду, нужно:

Mikhaylovskaya, L.; Nemova, D.; Antonova, D.;
 Software for carbon dioxide emissions in construction. A review;
 2022; *AlfaBuild*, 23 Article No 2305. doi: 10.57728/ALF.23.5

- рассчитать тепловое сопротивление и точку росы во всех конструкциях;
- вычислить CO₂ выбросы, а также энергию, затраченную на производство материала и количество отходов, образующихся на стадии производства.

Количество углевода, вырабатываемое каждым материалом различно, поэтому, нужно рассматривать ограждающие конструкции целюно с учетом неоднородности [89].

Для этого был использован плагин One Click LCA в программном комплексе Revit, в котором были выполнены модели здания с вариантами рассматриваемых типов конструкций и соотнесены с материалами из базы данных One Click LCA.

В Таблице 4 показаны результаты выброса углеродного следа, энергия, необходимая на производство конструкции и отходы, образованные от каждой структуры материала. В соответствии с требованиями, значение сопротивления теплопередачи для Оренбурга составляет 2,721 м²·°С/Вт. Все рассмотренные конструкции отвечают требованиям по тепловой защите зданий. Расчеты произведены на квадратный метр стены с учетом толщины каждого слоя [90].

Таблица 4. Расчетные параметры ограждающих конструкций
Table 4. Design parameters of enclosing structures

Тип	CO ₂ , кг	Затраченная энергия на производство 1 кв.м. фасада, Дж	Отходы, кг	Сопротивление теплопередаче, м ² ·°С/Вт
1	123,363	2128,42	9,01	2,831
2	122,330	2152,00	9,00	3,380
3	104,609	3058,75	9,28	3,124
4	152,060	2095,54	11,09	2,817
5	151,570	2107,93	11,09	3,226
6	141,112	2862,49	11,32	2,817

Для более наглядного сравнения диаграмма результатов представлена на Рис. 2.

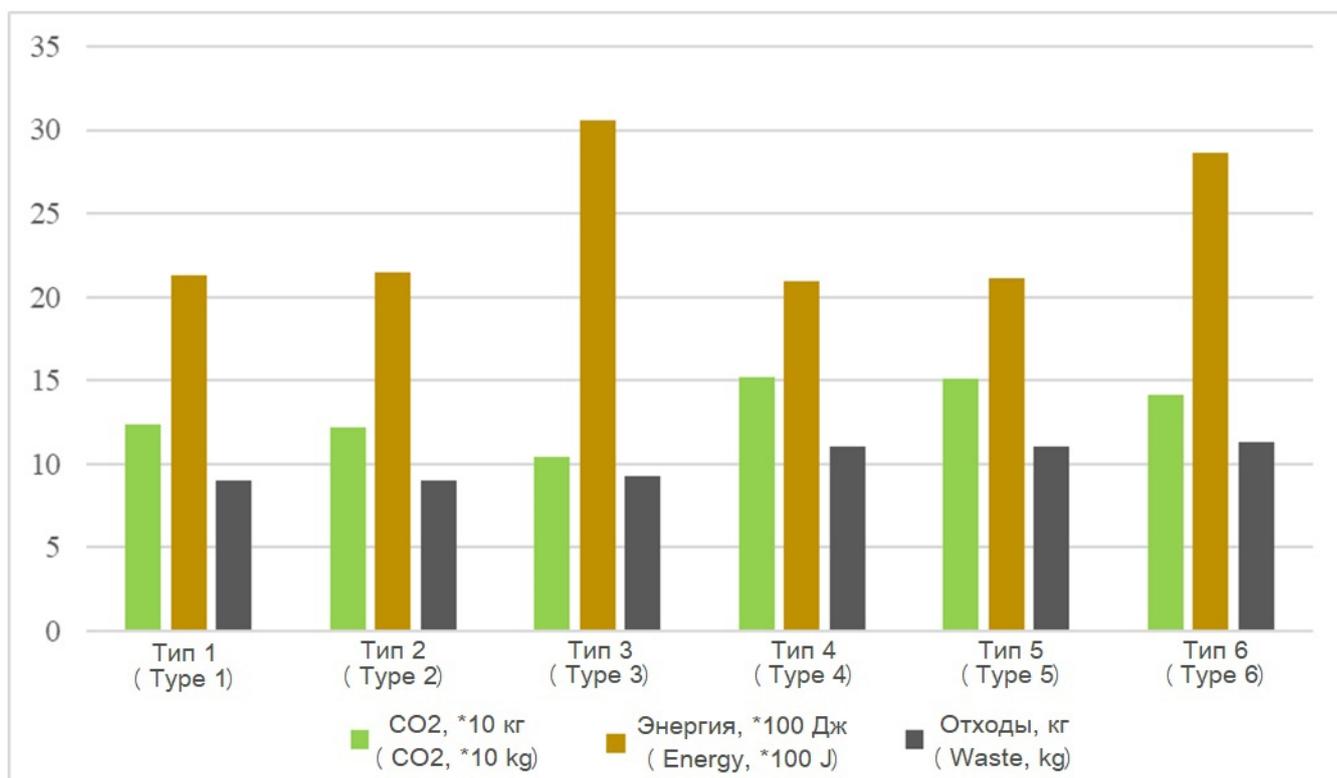


Рис. 2. Экологические параметры ограждающих конструкций
Fig. 2. Environmental parameters of enclosing structures



Как видно из диаграммы, разница выбросов углерода систем с представленными утеплителями не так заметна, хотя разница экструдированного полистирола и аэрогеля на стеклохолсте составляет 15%. В большей мере на значение выбросов углерода влияет выбор облицовки системы. Декоративная штукатурка более экологична из-за минимального объема применимого к структуре, но исходя из расчета затраченной энергии – энергозатратна. Исходя из всех характеристик, полученных в результате, наиболее рациональной системой для реконструкции зданий является выбор декоративной штукатурной смеси. Для рассмотренных изоляционных слоев рекомендуется использовать аэрогель. Но так как на рынке еще мало производителей и доставка в регионы трудозатратна, можно рекомендовать к использованию вспененный полиизоцианурат. Также стоит учитывать, что в рассмотренном варианте несущей конструкцией является силикатный кирпич, которой не поддавался вариации.

5 Conclusions

Специализированные программные средства по подсчету и регулированию углеродного следа активно развиваются и совершенствуются. Однако лидирующее место занимают интернет-сервисы, так как предоставляют более широкий функционал.

Проведенный анализ показал, что каждый сервис является доступным и помогает с подбором мероприятий и решений, чтобы уменьшить потребление ресурсов и снизить карбоновый след. Также разнovidность сервисов и их интерфейсов позволяет на разных уровнях проработки оценивать проект, а также проводить сравнительные анализы и выбирать наиболее рациональное решение.

Выбор строительных материалов с низким энергопотреблением может привести к увеличению переработанной энергии, отходов или выбросу углекислого газа. Выявлена необходимость рациональной комбинации структуры слоёв в ограждающей конструкции в условиях реконструкции. Это поможет достичь энергоэффективной и безвредной для окружающей среды оболочки здания.

References

- 1 V. A. Umnov, O. S. Korobova, and A. A. Skryabina, "CARBON FOOTPRINT AS AN INDICATOR OF THE IMPACT OF THE ECONOMY ON THE CLIMATE SYSTEM," *RSUH/RGGU Bulletin. Series Economics. Management. Law*, no. 2, pp. 85–93, 2020, doi: 10.28995/2073-6304-2020-2-85-93.
- 2 "Architecture 2030 challenge [Online]." https://architecture2030.org/2030_challenges/2030-challenge/ (accessed Jul. 24, 2022).
- 3 "WorldGBC 2020 Bringing Embodied Carbon Upfront." <https://www.worldgbc.org/embodied-carbon> (accessed Jul. 22, 2022).
- 4 X. Liang, G. Q. Shen, and L. Guo, "Improving management of green retrofits from a stakeholder perspective: A case study in China," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 12, no. 11, pp. 13823–13842, Oct. 2015, doi: 10.3390/ijerph121113823.
- 5 M. Nilsen and R. A. Bohne, "Evaluation of BIM based LCA in early design phase (low LOD) of buildings," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Sep. 2019, vol. 323, no. 1. doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012119.
- 6 J. Basbagill, F. Flager, M. Lepech, and M. Fischer, "Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts," *Building and Environment*, vol. 60, pp. 81–92, 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.11.009.
- 7 G. A. Blengini and T. di Carlo, "The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings," *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 6, pp. 869–880, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.12.009.
- 8 U. Y. A. Tettey, A. Doodoo, and L. Gustavsson, "Effects of different insulation materials on primary energy and CO₂ emission of a multi-storey residential building," *Energy and Buildings*, vol. 82, pp. 369–377, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.07.009.
- 9 Y. Lu, S. Wang, and K. Shan, "Design optimization and optimal control of grid-connected and standalone nearly/net zero energy buildings," *Applied Energy*, vol. 155. Elsevier Ltd, pp. 463–477, Oct. 01, 2015. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.06.007.



- 10 D. Gossard, B. Lartigue, and F. Thellier, "Multi-objective optimization of a building envelope for thermal performance using genetic algorithms and artificial neural network," *Energy and Buildings*, vol. 67, pp. 253–260, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.08.026.
- 11 T. Häkkinen, M. Kuittinen, A. Ruuska, and N. Jung, "Reducing embodied carbon during the design process of buildings," *Journal of Building Engineering*, vol. 4, pp. 1–13, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.jobe.2015.06.005.
- 12 A. Zani, O. Ladipo, A. D'Aquilio, C. G. Galante, M. Tee, and T. C. Vargas, "Facade design process to establish and achieve net zero carbon building targets," in *Journal of Physics: Conference Series*, Dec. 2021, vol. 2069, no. 1. doi: 10.1088/1742-6596/2069/1/012199.
- 13 F. Shadram, T. D. Johansson, W. Lu, J. Schade, and T. Olofsson, "An integrated BIM-based framework for minimizing embodied energy during building design," *Energy and Buildings*, vol. 128, pp. 592–604, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.07.007.
- 14 X. Li, F. Yang, Y. Zhu, and Y. Gao, "An assessment framework for analyzing the embodied carbon impacts of residential buildings in China," *Energy and Buildings*, vol. 85, pp. 400–409, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.09.051.
- 15 P. Jones, S. S. Hou, and X. Li, "Towards zero carbon design in offices: Integrating smart facades, ventilation, and surface heating and cooling," *Renewable Energy*, vol. 73, pp. 69–76, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.06.027.
- 16 M. Hamdy, A. T. Nguyen, and J. L. M. Hensen, "A performance comparison of multi-objective optimization algorithms for solving nearly-zero-energy-building design problems," *Energy and Buildings*, vol. 121, pp. 57–71, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.03.035.
- 17 F. Moran, T. Blight, S. Natarajan, and A. Shea, "The use of Passive House Planning Package to reduce energy use and CO₂ emissions in historic dwellings," *Energy and Buildings*, vol. 75, pp. 216–227, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.12.043.
- 18 A. Figueiredo, J. Figueira, R. Vicente, and R. Maio, "Thermal comfort and energy performance: Sensitivity analysis to apply the Passive House concept to the Portuguese climate," *Building and Environment*, vol. 103, pp. 276–288, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.03.031.
- 19 M. Bonomolo, S. di Lisi, and G. Leone, "Building information modelling and energy simulation for architecture design," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 5, pp. 1–32, Mar. 2021, doi: 10.3390/app11052252.
- 20 F. Ascione, N. Bianco, C. de Stasio, G. M. Mauro, and G. P. Vanoli, "A new methodology for cost-optimal analysis by means of the multi-objective optimization of building energy performance," *Energy and Buildings*, vol. 88, pp. 78–90, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.11.058.
- 21 "Ediclimate EC700 [Online]." <https://www.edilclima.it/software-termotecnica/prog-termotecnica-energetica/scheda/700> (accessed Jul. 22, 2022).
- 22 "COMFIE [Online]." <https://www.ces.minesparis.psl.eu/Logiciels/COMFIE/> (accessed Jul. 22, 2022).
- 23 "FirstRate5 [Online]." <https://www.fr5.com.au> (accessed Jul. 22, 2022).
- 24 "ISL [Online]." <https://www.iesve.com/software/virtual-environment> (accessed Jul. 22, 2022).
- 25 "TRNSYS [Online]." <https://trnsys.com> (accessed Jul. 22, 2022).
- 26 "analyays.tool [Online]." <https://www.cove.tools/analysis-tool-energy-modeling-software> (accessed Jul. 22, 2022).
- 27 "eQUEST [Online]." <https://www.equestsoftware.com> (accessed Jul. 22, 2022).
- 28 "IDA ICE [Online]." <https://www.equa.se/en/ida-ice> (accessed Jul. 22, 2022).
- 29 "Green Building Studio," <https://gbs.autodesk.com/gbs>.
- 30 M. K. Le, "AUTODESK® GREEN BUILDING STUDIO FOR AN ENERGY-EFFICIENT, SUSTAINABLE BUILDING," 2014. [Online]. Available: <https://gbs.autodesk.com>
- 31 "EcoDesigner – Graphisoft [Online]." <https://graphisoft.com/downloads/ecodesigner> (accessed Apr. 20, 2022).
- 32 "One Click LCA [Online]." <https://www.oneclicklca.com/carbon-designer-3d/> (accessed Apr. 12, 2022).
- 33 M. Al-Obaidy, L. Courard, and S. Attia, "A Parametric Approach to Optimizing Building Construction Systems and Carbon Footprint: A Case Study Inspired by Circularity Principles," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 6, Mar. 2022, doi: 10.3390/su14063370.
- 34 M. Al-Obaidy, M. C. Santos, M. Baskar, and S. Attia, "Assessment of the circularity and carbon neutrality of an office building: The case of t Centrum in Westerlo, Belgium," in *IOP Conference*



Series: *Earth and Environmental Science*, Dec. 2021, vol. 855, no. 1. doi: 10.1088/1755-1315/855/1/012025.

- 35 “ESG, Sustainability, Climate Change, ESG Consulting [Online].” <http://www.carbonfixers.com/resources/> (accessed Apr. 12, 2022).
- 36 “DesignBuilder Software Ltd [Online].” <https://designbuilder.co.uk> (accessed Apr. 21, 2022).
- 37 H. Yang, K. Kikuta, and M. Hayashi, “Research on Carbon Reduction of Residential Buildings in Severe Cold Regions Based on Renovation of Envelopes,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 5, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15051873.
- 38 Z. Dong, K. Zhao, Y. Liu, and J. Ge, “Performance investigation of a net-zero energy building in hot summer and cold winter zone,” *Journal of Building Engineering*, vol. 43, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103192.
- 39 M. Gao, L. Zhang, H. Zhang, and W. Wang, “Research on the influence of different heating strategies on energy consumption and carbon emission of a teaching building in Urumqi,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 318–326, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.05.054.
- 40 “BuildingTransparency EC3 [Online].” <http://buildingtransparency.org> (accessed Apr. 21, 2022).
- 41 O. Ortiz, F. Castells, and G. Sonnemann, “Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA,” *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 1, pp. 28–39, Jan. 2009. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012.
- 42 R. Assiego De Larriva, G. Calleja Rodríguez, J. M. Cejudo López, M. Raugei, and P. Fullana I Palmer, “A decision-making LCA for energy refurbishment of buildings: Conditions of comfort,” *Energy and Buildings*, vol. 70, pp. 333–342, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.11.049.
- 43 S. H. Khahro, D. Kumar, F. H. Siddiqui, T. H. Ali, M. S. Raza, and A. R. Khoso, “Optimizing energy use, cost and carbon emission through building information modelling and a sustainability approach: A case-study of a hospital building,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 7, Apr. 2021, doi: 10.3390/su13073675.
- 44 R. Jagarajan, N. Abdullah, M. Asmoni, J. Y. Lee, and N. Jaafar, “Jurnal Teknologi An Overview of Green Retrofitting Implementation in Non Residential Existing Buildings,” 2015. [Online]. Available: www.jurnalteknologi.utm.my
- 45 O. Fahlstedt, A. Temeljotov-Salaj, J. Lohne, and R. A. Bohne, “Holistic assessment of carbon abatement strategies in building refurbishment literature — A scoping review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 112636, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112636.
- 46 A. Ahmed, M. Mateo-Garcia, D. McGough, and M. Gaterell, “Methodology for Evaluating Innovative Technologies for Low-Energy Retrofitting of Public Buildings,” in *Energy Procedia*, Mar. 2017, vol. 112, pp. 166–175. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1078.
- 47 C. Langston, E. H. W. Chan, and E. H. K. Yung, “Hybrid input-output analysis of embodied carbon and construction cost differences between new-build and refurbished projects,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 9, Sep. 2018, doi: 10.3390/su10093229.
- 48 T. Häkkinen, *Sustainable refurbishment of exterior walls and building facades. Final report, Part B – General refurbishment concepts*. 2012. [Online]. Available: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>
- 49 P. Kaderják and Seventh Framework Programme (European Commission), *How to refurbish all buildings by 2050: final report, June 2012*. European University Institute, 2012.
- 50 F. M. Amoruso, M. H. Sonn, and T. Schuetze, “Carbon-neutral building renovation potential with passive house-certified components: Applications for an exemplary apartment building in the Republic of Korea,” *Building and Environment*, vol. 215, May 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.108986.
- 51 T. Dalla Mora, F. Peron, P. Romagnoni, M. Almeida, and M. Ferreira, “Tools and procedures to support decision making for cost-effective energy and carbon emissions optimization in building renovation,” *Energy and Buildings*, vol. 167, pp. 200–215, May 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.02.030.
- 52 M. Panagiotidou, L. Aye, and B. Rismanchi, “Optimisation of multi-residential building retrofit, cost-optimal and net-zero emission targets,” *Energy and Buildings*, vol. 252, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111385.
- 53 W. Jiang *et al.*, “Net-zero energy retrofit of rural house in severe cold region based on passive insulation and BAPV technology,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 360, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132198.



- 54 G. M. Mauro, M. Hamdy, G. P. Vanoli, N. Bianco, and J. L. M. Hensen, "A new methodology for investigating the cost-optimality of energy retrofitting a building category," *Energy and Buildings*, vol. 107, pp. 456–478, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.08.044.
- 55 E. M. Malatji, J. Zhang, and X. Xia, "A multiple objective optimisation model for building energy efficiency investment decision," *Energy and Buildings*, vol. 61, pp. 81–87, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.01.042.
- 56 B. Wang, X. Xia, and J. Zhang, "A multi-objective optimization model for the life-cycle cost analysis and retrofitting planning of buildings," *Energy and Buildings*, vol. 77, pp. 227–235, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.03.025.
- 57 Z. Peng, S. Zhao, L. Shen, Y. Ma, Q. Zhang, and W. Deng, "Retrofit or rebuild? The future of old residential buildings in urban areas of China based on the analysis of environmental benefits," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 16, no. 4, pp. 1422–1434, Dec. 2021, doi: 10.1093/ijlct/ctab070.
- 58 O. K. Akande, D. Odeleye, and A. Coday, "Energy efficiency for sustainable reuse of public heritage buildings: The case for research," *International Journal of Sustainable Development and Planning*, vol. 9, no. 2, pp. 237–250, 2014, doi: 10.2495/SDP-V9-N2-237-250.
- 59 M. Amirkhani, I. Martek, and M. B. Luther, "Mapping research trends in residential construction retrofitting: A scientometric literature review," *Energies*, vol. 14, no. 19, MDPI, Oct. 01, 2021. doi: 10.3390/en14196106.
- 60 V. Peyramale and C. Wetzel, "Analyzing the Energy-saving Potential of Buildings for Sustainable Refurbishment," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 38, pp. 162–168, 2017, doi: 10.1016/j.proenv.2017.03.098.
- 61 J. Rose, J. Kragh, and K. F. Nielsen, "Passive house renovation of a block of flats – Measured performance and energy signature analysis," *Energy and Buildings*, vol. 256, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111679.
- 62 S. K. Sharma *et al.*, "Retrofitting Existing Buildings to Improve Energy Performance," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 2, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14020666.
- 63 A. Charles, W. Maref, and C. M. Ouellet-Plamondon, "Case study of the upgrade of an existing office building for low energy consumption and low carbon emissions," *Energy and Buildings*, vol. 183, pp. 151–160, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.10.008.
- 64 R. Volk, J. Stengel, and F. Schultmann, "Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs," *Automation in Construction*, vol. 38, pp. 109–127, Mar. 2014. doi: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.
- 65 M. Paleari, M. Lavagna, and A. Campioli, "The assessment of the relevance of building components and life phases for the environmental profile of nearly zero-energy buildings: life cycle assessment of a multifamily building in Italy," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, no. 12, pp. 1667–1690, Dec. 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1133-6.
- 66 M. Robati, D. J. Daly, and G. Kokogiannakis, "A method of uncertainty analysis for whole-life embodied carbon A method of uncertainty analysis for whole-life embodied carbon emissions (CO₂-e) of building materials of a net-zero energy emissions (CO₂-e) of building materials of a net-zero energy building in Australia building in Australia." [Online]. Available: <https://ro.uow.edu.au/eispapers1https://ro.uow.edu.au/eispapers1/2546>
- 67 P. Pasanen and R. Castro, "Carbon Heroes Benchmark Program - Whole building embodied carbon profiling," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Sep. 2019, vol. 323, no. 1. doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012028.
- 68 L. F. Cabeza, L. Rincón, V. Vilariño, G. Pérez, and A. Castell, "Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, Elsevier Ltd, pp. 394–416, 2014. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.037.
- 69 A. T. H. Le, K. S. Park, N. Domingo, E. Rasheed, and N. Mithraratne, "Sustainable refurbishment for school buildings: a literature review," *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, vol. 39, no. 1, Emerald Group Holdings Ltd., pp. 5–19, Feb. 10, 2021. doi: 10.1108/IJBPA-01-2018-0009.
- 70 A. Balali and A. Valipour, "Identification and selection of building façade's smart materials according to sustainable development goals," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 26, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.susmat.2020.e00213.



- 71 M. Braulio-Gonzalo and M. D. Bovea, "Environmental and cost performance of building's envelope insulation materials to reduce energy demand: Thickness optimisation," *Energy and Buildings*, vol. 150, pp. 527–545, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.06.005.
- 72 L. F. Cabeza, C. Barreneche, L. Miró, J. M. Morera, E. Bartolí, and A. Inés Fernández, "Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 536–542, 2013. doi: 10.1016/j.rser.2013.03.017.
- 73 E. Antipova, D. Boer, G. Guillén-Gosálbez, L. F. Cabeza, and L. Jiménez, "Multi-objective optimization coupled with life cycle assessment for retrofitting buildings," *Energy and Buildings*, vol. 82, pp. 92–99, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.07.001.
- 74 E. Giama, E. Kyriaki, P. Antoniadou, M. Symeonidou, and A. M. Papadopoulos, "Energy and environmental evaluation of retrofitting facades for zero energy buildings: The case of an office building in Greece," in *Journal of Physics: Conference Series*, Dec. 2021, vol. 2069, no. 1. doi: 10.1088/1742-6596/2069/1/012108.
- 75 C. Far and H. Far, "Improving energy efficiency of existing residential buildings using effective thermal retrofit of building envelope," *Indoor and Built Environment*, vol. 28, no. 6, pp. 744–760, Jul. 2019, doi: 10.1177/1420326X18794010.
- 76 I.-F. Häfliger *et al.*, "Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials," 2017. [Online]. Available: <http://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/2>
- 77 S. Paiho, I. P. Seppä, and C. Jimenez, "An energetic analysis of a multifunctional façade system for energy efficient retrofitting of residential buildings in cold climates of Finland and Russia," *Sustainable Cities and Society*, vol. 15, pp. 75–85, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.scs.2014.12.005.
- 78 N. Jahed, I. G. Dino, N. Jahed, and I. G. Dino, "Performance-Based Façades: Retrofit Strategies for Energy Efficiency and Comfort in Existing Office Buildings," 2018. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/327791294>
- 79 S. Zuhair, M. Hajdukiewicz, M. Keane, and J. Goggins, "Façade modernisation for retrofitting existing buildings to achieve nearly zero energy buildings," in *Structures and Architecture - Proceedings of the 3rd International Conference on Structures and Architecture, ICSA 2016*, 2016, pp. 599–606. doi: 10.1201/b20891-83.
- 80 A. M. Arias, D. Noble, M. Schiler, and M. Patterson, "Facade Retrofit: Strategies for energy reduction in an office building in a mild climate."
- 81 J. Iwaro, A. Mwashia, R. G. Williams, and R. Zico, "An Integrated Criteria Weighting Framework for the sustainable performance assessment and design of building envelope," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 417–434, 2014. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.096.
- 82 P. A. Nguyen, R. Bokel, and A. van den Dobbelsteen, "Facade Refurbishment For Energy Saving In Tube Houses A case study in Hanoi, Vietnam", doi: 10.1051/e3sconf/2019111030.
- 83 C. Hill, A. Norton, and J. Dibdiakova, "A comparison of the environmental impacts of different categories of insulation materials," *Energy and Buildings*, vol. 162, pp. 12–20, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.12.009.
- 84 S. S. Shrestha, K. Biswas, and A. O. Desjarlais, "A protocol for lifetime energy and environmental impact assessment of building insulation materials," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 46, pp. 25–31, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.eiar.2014.01.002.
- 85 A. Aslani and C. Hachem-Vermette, "Energy and environmental assessment of high-performance building envelope in cold climate," *Energy and Buildings*, vol. 260, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.111924.
- 86 A. S. Elgohary, H. M. Elbadrawy, and S. Khashaba, "Optimizing energy performance using silica aerogel material in building envelope," *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, vol. 13, no. 1, pp. 69–83, 2022, doi: 10.22712/susb.20220006.
- 87 Y. Wang *et al.*, "Life cycle assessment of a novel biomass-based aerogel material for building insulation," *Journal of Building Engineering*, vol. 44, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102988.
- 88 K. I. Praseeda, B. v. Venkatarama Reddy, and M. Mani, "Embodied and operational energy of rural dwellings in India," *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 38, no. 3, pp. 227–237, Mar. 2019, doi: 10.1080/14786451.2017.1418742.
- 89 D. Zaborova and T. Musorina, "Environmental and Energy-Efficiency Considerations for Selecting Building Envelopes," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 10, May 2022, doi: 10.3390/su14105914.



90 V. Krykun, "SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND ECOLOGICAL RESPONSIBILITY OF BUSINESS," 2016.