

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-1-69-80

УДК 697.93

**О. М. ЛОБИКОВА**

**А. В. СУБОЧ**

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

## МНОГОФАКТОРНАЯ КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПРОЕКТОВ С УЧЕТОМ LCA

### Аннотация

Приведены результаты анализа различных вариантов конструкций стен малоэтажного жилого здания. Произведены расчеты, необходимые для проектирования. Выполнена оценка жизненного цикла материалов (LCA). На основе полученных результатов построены лепестковые диаграммы и выполнена комплексная оценка по вариантам проектирования. Разработана методика многофакторной комплексной оценки проектов с учетом LCA (оценки жизненного цикла материалов). Данная методика может быть рекомендована к использованию при выборе конструктивных решений в малоэтажном домостроении для снижения экологической нагрузки строительства на окружающую среду.

### Ключевые слова:

строительство, оценка жизненного цикла, строительные материалы, углекислый газ, ограждающие конструкции.

### Для цитирования:

Лобикова, О. М. Многофакторная комплексная оценка проектов с учетом LCA / О. М. Лобикова, А. В. Субоч // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 1 (86). – С. 69–80.

### Введение

На основе принятой в 2015 г. ООН Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 г. разработана Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь до 2035 г., одним из основных трендов которой является построение экономики и общества, основанных, в том числе, на инновациях и эффективном использовании природных ресурсов. Одним из вызовов для устойчивого развития Беларуси является гарантия благоприятной, с точки зрения экологии, среды жизнедеятельности населения. При этом все еще остаются актуальными для нашей страны экологические проблемы, связанные с химическим загрязнением почвы, воздушного бассейна, снижением объемов производственных отходов и включением их в экономический оборот [1, 2]. Строительная отрасль является одним из крупнейших потребителей

ресурсов и способствует загрязнению воздушного бассейна и почвы. После окончания своего срока службы здания становятся источником сырья и выбросов загрязняющих веществ [3]. Важным трендом современного строительного производства является минимизация вредного воздействия объекта на окружающую среду.

В Беларуси набирает темпы применение информационного моделирования (BIM) [4]. Оценка жизненного цикла здания (LCA) позволяет учесть, с использованием BIM, влияние объекта строительства на окружающую среду, начиная со стадии производства материалов, используемых для строительства объекта, и заканчивая стадией ликвидации объекта, утилизацией и повторным использованием полученных при разборке материалов [5–10]. Заключение о выборе конкретного проектного решения здания должно приниматься с учетом комплекса факторов, в том числе минимума оказываемого вреда для

окружающей среды [7, 11, 12]. Решение данных проблем возможно только в случае комплексного системного автоматизированного подхода к ТЭО проектных решений, для реализации которого необходимо наличие четко сформулированной методики и доступного программного обеспечения.

### **Основная часть**

Для выполнения комплексной оценки, с учетом LCA, в Autodesk Revit-2019 смоделирован двухэтажный жилой дом общей площадью 225 м<sup>2</sup> (рис. 1). Заказчик определил критерии ТЭО: минимизация вредных выбросов

на всех этапах жизненного цикла здания при одновременном снижении затрат на стадии строительства [13].

Для данного проекта жилого дома были отобраны и смоделированы пять вариантов конструктивных решений и при помощи программного обеспечения Tally LCA для Autodesk Revit-2019 загружены объемы строительных материалов ограждающих конструкций [14]. Выполнен теплотехнический расчет, определены объемы применения ресурсов и затраты на производство работ. Все предложенные к дальнейшему исследованию варианты ограждающих конструкций удовлетворяют нормам по тепловой защите (табл. 1).



Рис. 1. 3D-модель проектируемого жилого здания

Табл. 1. Варианты конструктивных решений

Вариант конструкции стены	Перечень используемых материалов	Толщина слоя $\delta$ , м	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°С)	Фактическое сопротивление $R_0^{\text{ф}}$ в сравнении с требуемым сопротивлением $R_0^{\text{тп}}$ , (м <sup>2</sup> ·°С)/Вт
1	Глиняный пустотелый кирпич на цементно-известковом растворе	0,38	1400	0,380	5,84 $\geq$ 1,42
	Плиты минераловатные	0,15	45	0,034	
	Кладка на растворе с пористыми наполнителями камня керамического пустотелого	0,12	950	0,300	
	Штукатурка известковым раствором	0,02	1500	0,700	
2	Кладка из газосиликатных блоков	0,4	500	0,445	5,61 $\geq$ 1,42
	Плиты минераловатные	0,15	45	0,034	
	Кладка на растворе с пористыми наполнителями камня керамического пустотелого	0,12	950	0,481	
	Штукатурка известковым раствором	0,02	1500	0,700	
	Штукатурка наружных поверхностей составом защитно-отделочным крупнозернистым, цементная	0,07	1800	1,200	
3	Профилированный клееный брус (180 × 185 мм)	0,18	620	0,100	1,91 $\geq$ 1,42
	Акриловый герметик	0,005	1700	0,170	
	Масляно-восковая пропитка	0,01	880	0,120	
4	Бетон легкий	0,18	1800	0,520	4,79 $\geq$ 1,42
	Плиты минераловатные	0,15	45	0,034	
	Штукатурка известковым раствором	0,02	1500	0,700	
5	Бетон тяжелый класса С25/30 (В30)	0,18	2400	1,400	4,57 $\geq$ 1,42
	Плиты минераловатные	0,15	45	0,034	
	Штукатурка известковым раствором	0,02	1500	0,700	

Анализ воздействия на окружающую среду выполнен в Tally LCA – надстройке Autodesk Revit-2019 – раздельно по стадиям жизненного цикла здания (рис. 2) и основным показателям влияния на окружающую среду: глобальному потеплению (GWP); образованию смога (SFP); окислительно-восстановительному потенциалу (AP);

эвтрофикации (EP); количеству невозобновляемой энергии (NRE) [13, 14].

По итогам расчетов в Tally составлен отчет с численными параметрами факторов, оказывающих влияние на окружающую среду, и представлен в виде диаграмм с делением по типоразмерам из BIM-модели. Результаты расчетов приведены на рис. 3–8.



Рис. 2. Стадии жизненного цикла здания

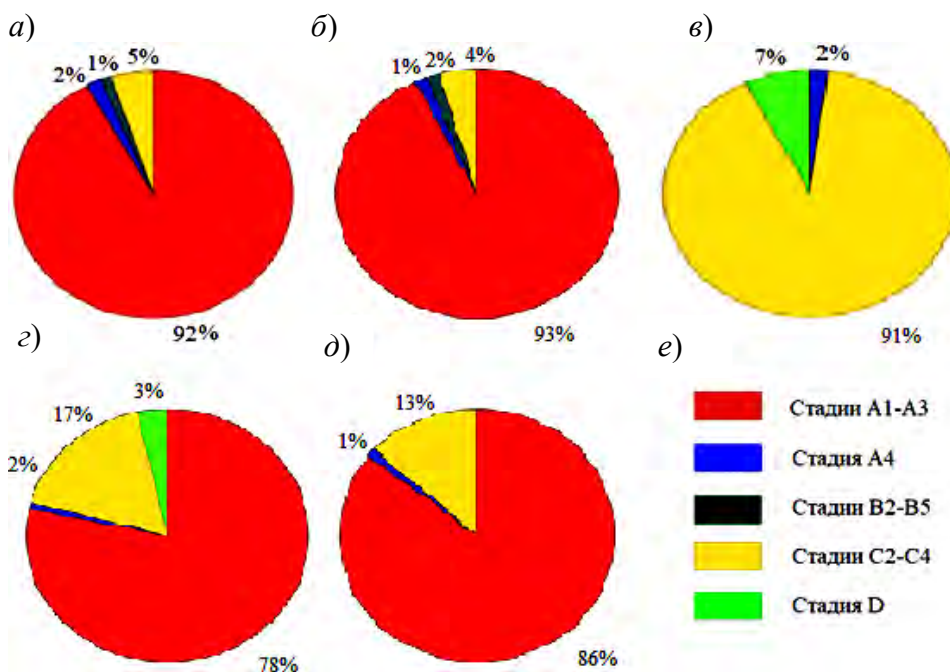


Рис. 3. Результаты расчетов потенциала глобального потепления в Tally: а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3; г – вариант 4; д – вариант 5; е – детализация по стадиям жизненного цикла

### Results per Life Cycle Stage

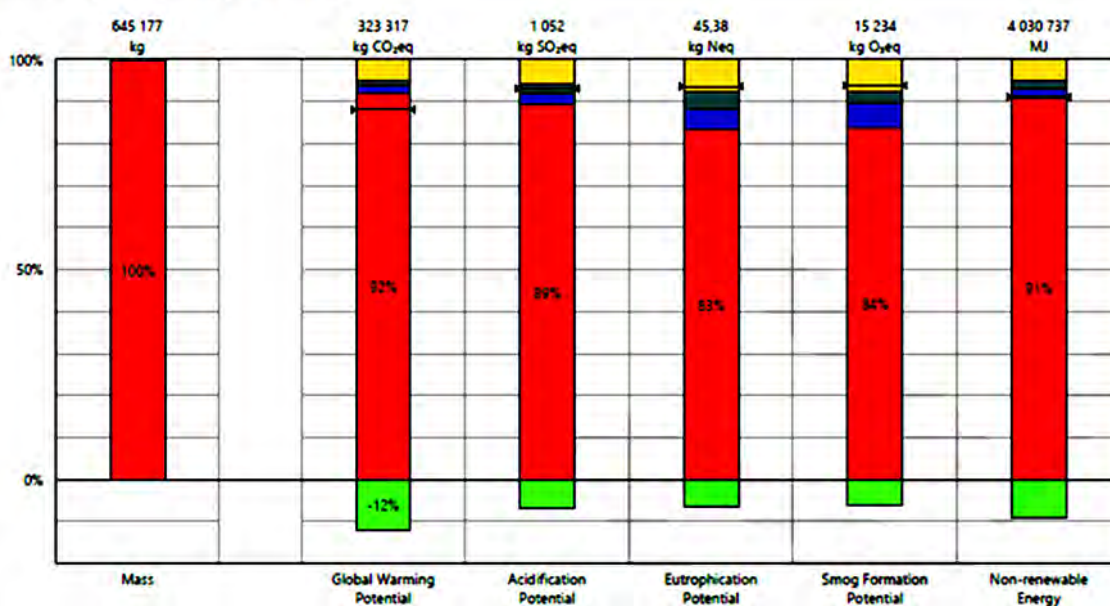


Рис. 4. Основные показатели влияния на окружающую среду по варианту 1

### Results per Life Cycle Stage

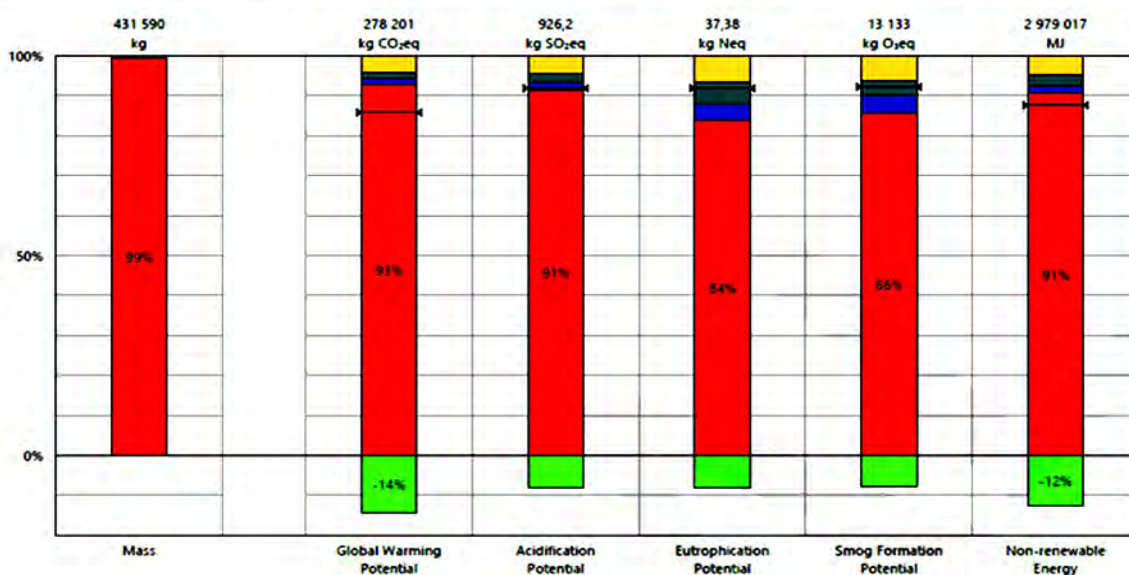


Рис. 5. Основные показатели влияния на окружающую среду по варианту 2

### Results per Life Cycle Stage

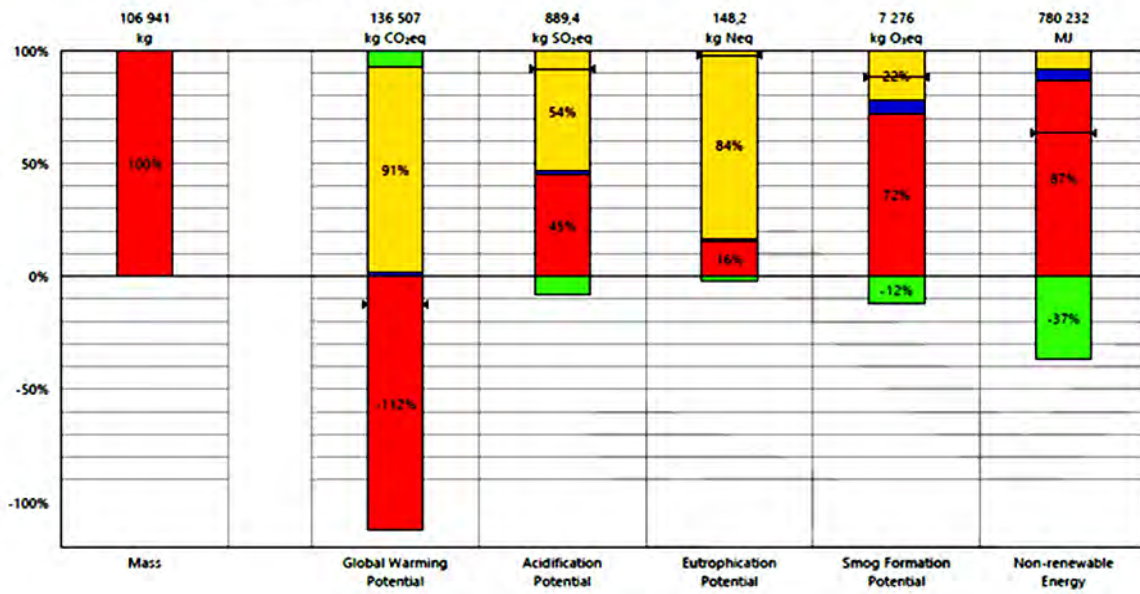


Рис. 6. Основные показатели влияния на окружающую среду по варианту 3

### Results per Life Cycle Stage

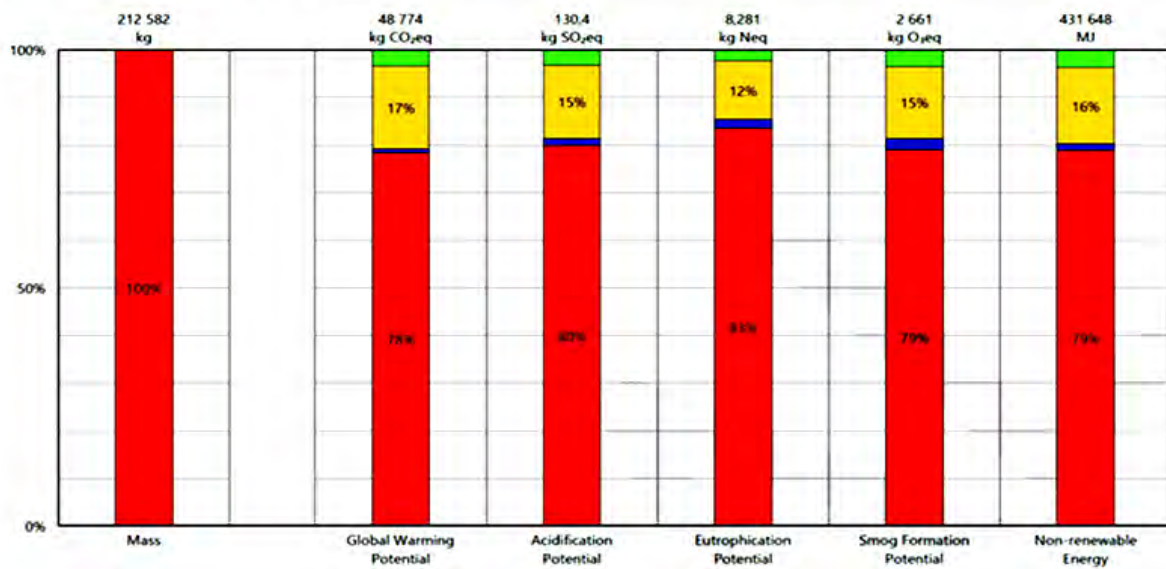


Рис. 7. Основные показатели влияния на окружающую среду по варианту 4

### Results per Life Cycle Stage

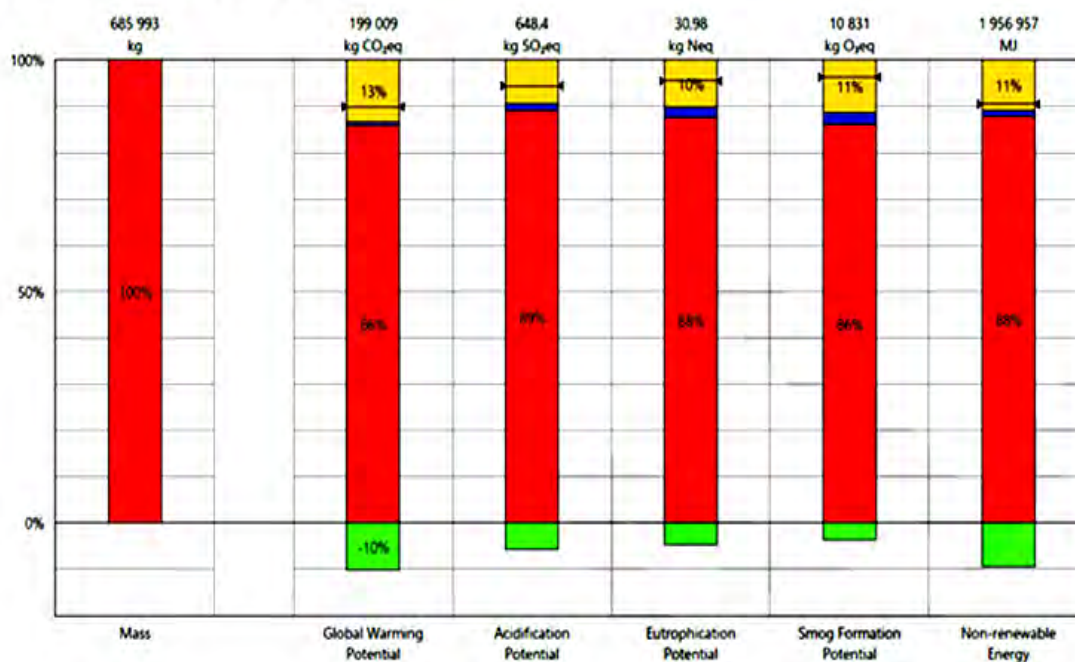


Рис. 8. Основные показатели влияния на окружающую среду по варианту 5

Результаты оценки жизненного цикла материалов ограждающих конструкций в Tally LCA в различных категориях воздействия по стадиям жизненного цикла получились противоречивыми. Так, наиболее неблагоприятное воздействие на окружающую среду оказывают следующие варианты конструктивных решений: в модулях А1–А4 – вариант 1; в модулях В2–В5 – вариант 2; в модулях С2–С4 – вариант 3; в модуле D – вариант 2. Самыми экологичными являются конструктивные решения: в модулях А1–А4 – вариант 2; в модулях В2–В5 – варианты 3–5; в модулях С2–С4 – вариант 2; в модуле D – варианты 1 и 4.

Для выбора оптимального варианта на основе выполненных расчетов LCA и определенных в программном комплексе Belsmeta cloud затрат на возведение ограждающих конструкций и приобретение строительных материалов в ценах на сентябрь 2024 г. (табл. 2)

в Microsoft Excel построена лепестковая диаграмма, позволяющая оценить рассматриваемые варианты по комплексу переменных (рис. 9). Для приведения разноименных показателей к единой базе был использован метод экспертной оценки.

В Microsoft Excel составлена программа и на основе диаграммы автоматизированным способом обработаны результаты по заданным критериям, выполнено ранжирование вариантов и определены комплексные показатели оценки  $K_{компл. i}$  каждого проекта, в качестве которых приняты площади фигур на диаграмме. Оптимальный вариант конструкции выбран на основе минимального значения комплексного показателя оценки. Результаты расчетов сведены в табл. 3. Рассматриваемые варианты конструктивных решений расположены в табл. 3 в порядке убывания их приоритетности.

Табл. 2. Результаты расчетов LCA, затраты на возведение и затраты на приобретение материалов по вариантам

Но- мер вари- анта	Потенциал глобального потепления GWP, кг CO <sub>2</sub> e/кг	Окислительно- восстановитель- ный AP, кг SO <sub>2</sub> e/кг	Эвтрофикация EP, кг Ne/кг	Образование смога SFP, кг O <sub>2</sub> e/кг	Невозобновля- емая энергия NRE, Дж	Затраты на возведение, р.	Затраты на приобретение материалов, р.	Затраты труда, чел.-ч
1	323317	1052	45,38	15234	4030737	78645	30136	1560,68
2	278201	926,2	37,38	13133	2979017	68022	25333	1372,65
3	136507	889,4	148,2	7276	780232	52636	25417	863,04
4	48774	130,4	8,281	2661	431648	60867	22651	1255,59
5	199009	648,4	30,98	10831	1956957	89807	42748	1482,93

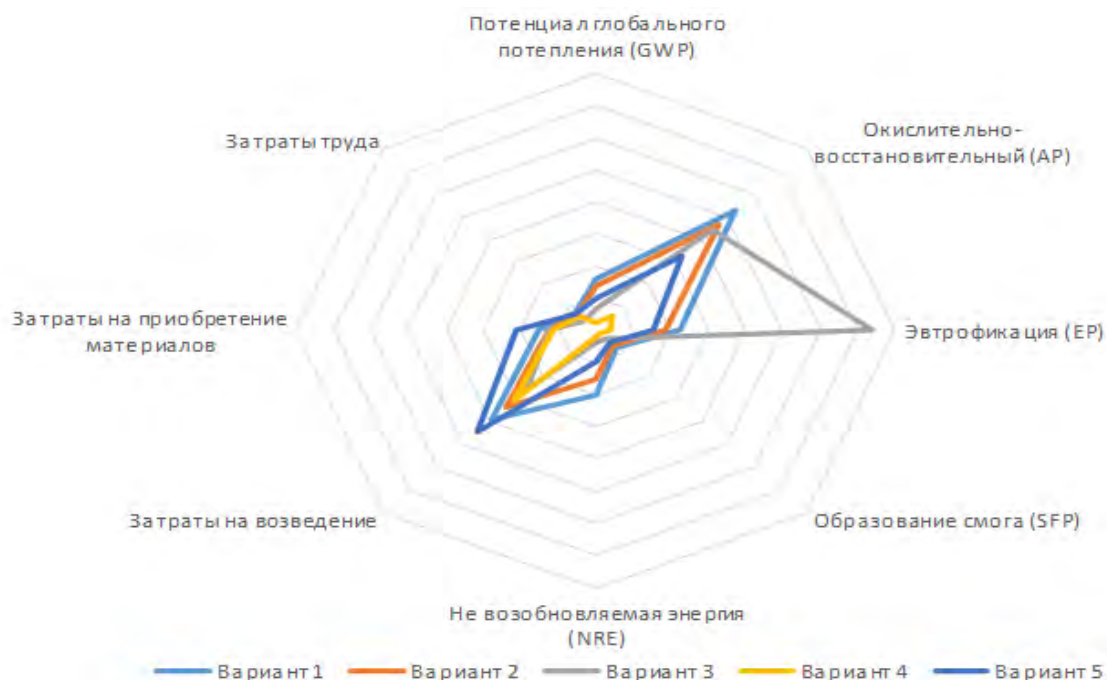


Рис. 9. Комплексная оценка проектов

Табл. 3. Ранжирование результатов исследования

Рейтинг варианта	Номер варианта	Комплексный показатель оценки $K_{компл. i}$
1	4	753
2	5	3562
3	2	3895
4	1	5476
5	3	6186



Полученные данные позволяют сделать выбор варианта ограждающих конструкций с учетом комплекса факторов и наряду с традиционными для оценки показателями стоимости и трудоемкости работ учесть неблагоприятное воздействие объекта на окружающую среду в течение всего жизненного цикла [15, 16].

По комплексу факторов оптимальным, с учетом минимального воздействия на окружающую среду, стоимости и трудоемкости возведения, является ва-

риант конструктивного решения 4. Второе и третье место с незначительным расхождением занимают варианты 5 и 2.

В соответствии с описанной методикой многофакторной комплексной оценки проектов ограждающих конструкций индивидуальных жилых домов в Беларуси, с учетом оценки жизненного цикла здания (LCA) разработан алгоритм проведения исследований и автоматизированного ранжирования вариантов в Microsoft Excel (рис. 10).

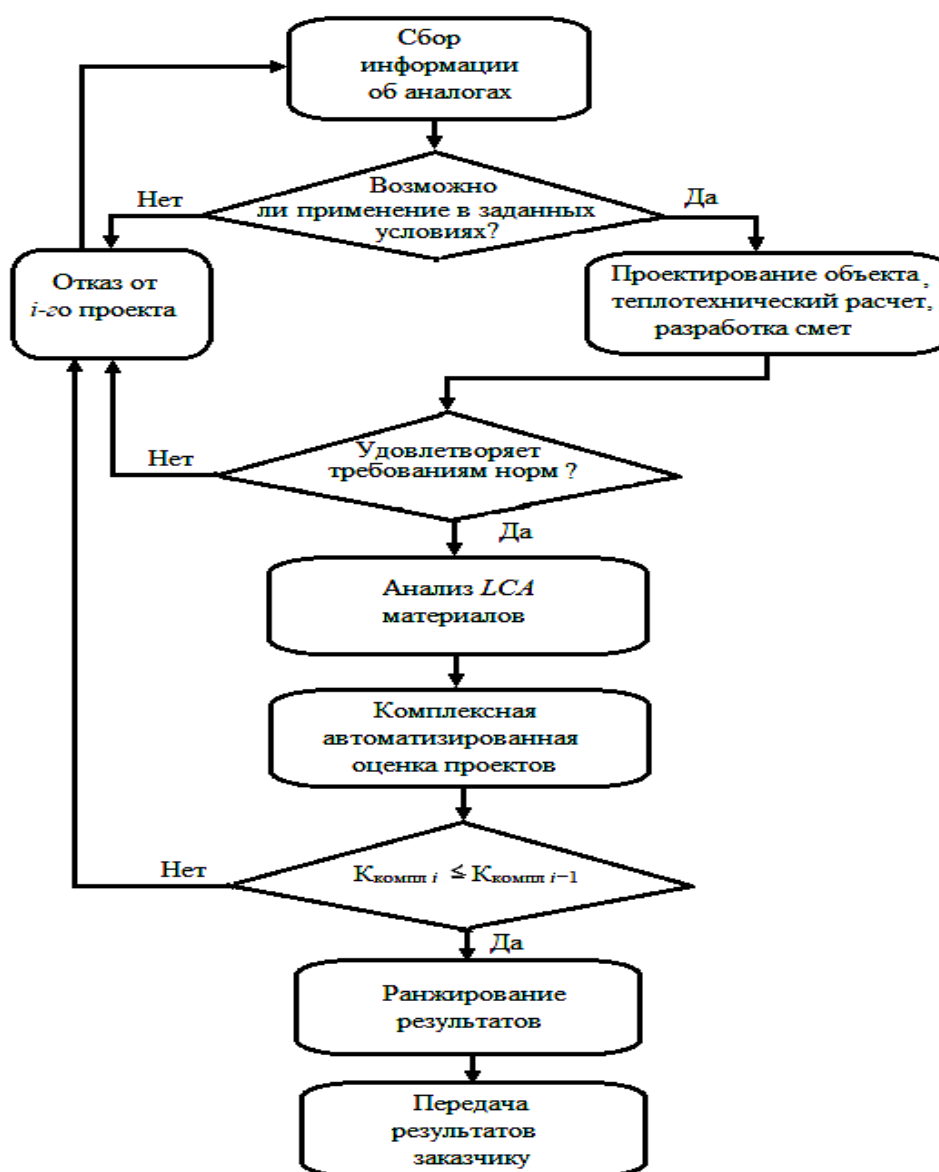


Рис. 10. Алгоритм многофакторной комплексной оценки проектов с учетом LCA

### Заключение

Выбор оптимального варианта конструктивного решения здания, в полном объеме удовлетворяющего требованиям и ожиданиям заказчика в течение всего жизненного цикла, возможен при детальной проработке множества решений на предынвестиционной стадии. А для этого необходимо наличие методики для выбора оптимального варианта и доступного программного обеспечения.

Разработанная методика многофакторной комплексной оценки проектов, с учетом LCA, предполагает проработку большого количества вариантов проектных решений без увеличения трудоемкости проектирования и выбор в автоматизированном режиме оптимального проекта по заданным заказчиком критериям оценки.

Произведены расчеты, необходимые для проектирования ограждающих конструкций. Выполнен анализ различных вариантов конструкций стен. Для определения инвестиционной эффективности конструкций стен произведен сметный расчет стоимости. Выполнена оценка жизненного цикла материалов (LCA). Разработана методика и выполнен расчет комплексного показателя оценки и на его основе выбран оптимальный вариант конструктивного ре-

шения.

Научная новизна данной методики состоит в комплексном подходе к проведению ТЭО конструктивных решений, использовании наряду с традиционными критериями (минимальные затраты, трудоемкость) оценки жизненного цикла материалов (LCA).

Представленная методика многофакторной комплексной оценки проектов, с учетом LCA, позволяет в автоматизированном режиме выбрать вариант по заданным параметрам с учетом индивидуальных требований заказчика, рассмотреть большее количество вариантов, сократить затраты на проектирование, сохранить окружающую среду.

Данная методика может быть рекомендована к использованию при проведении ТЭО инвестиционных проектов. Применение разработанной методики на предынвестиционной стадии будет являться вкладом в решение экологических проблем Беларуси, связанных с химическим загрязнением почвы, воздушного бассейна, снижением объемов производственных отходов и включением их в экономический оборот, и будет способствовать повышению индекса экологической эффективности страны.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные подходы к формированию НСУР-2035 в контексте имплементации целей в области устойчивого развития ООН. – URL: [https://mfa.gov.by/kcfinder/upload/files/GUMDI/SDG\\_start.pdf](https://mfa.gov.by/kcfinder/upload/files/GUMDI/SDG_start.pdf) (дата обращения: 20.09.2024).
2. Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь до 2035 года. – URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/ObsugdaemNPA/NSUR-2035-1.pdf> (дата обращения: 20.09.2024).
3. **Лобикова, О. М.** Оценка экологической безопасности строительства / О. М. Лобикова // Экологическая неделя БРУ–СПбПУ: материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. – СПб., 2023. – С. 40–46.
4. **Lasvaux, S.** Study of a Simplified Model for the Life Cycle Analysis of Buildings / S. Lasvaux. – Paris Institute de Technologie, 2010. – 14 p.

5. **Хроменок, Н. В.** Обоснование эффективности исследований экологической безопасности зданий на основе метода LCA / Н. В. Хроменок, М. Ю. Слесарев // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: материалы XXVIII Междунар. науч.-практ. конф. – Morrisville, 2022. – С. 120–129.
6. **Самойлов, Е. К.** Применение BIM-технологий при оценке экологических аспектов реновации объектов индустриального наследия методом LCA / Е. К. Самойлов // Система управления экологической безопасностью: сб. тр. XVII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. различным теоретическим и практическим аспектам экологической безопасности. – Екатеринбург : Урал. федер. ун-т имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2023. – С. 78–84.
7. **Левада, А. В.** Оценка жизненного цикла на основе BIM-модели для зеленого строительства / А. В. Левада, Д. В. Немова // Неделя науки ИСИ: материалы Всерос. конф.: в 3 ч. – СПб.: Инженерно-строит. ин-т С.-Петерб. политехн. ун-та Петра Великого, 2021. – С. 374–376.
8. **Лобикова, О. М.** Применение цифровых технологий в оценке жизненного цикла объекта / О. М. Лобикова, А. В. Субоч, Н. В. Сапранков // Экономика и бизнес в условиях цифровой трансформации и новых вызовов: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – М., 2024. – С. 75–87.
9. **Dyudyaev, I. A.** Nuclear vs. Renewables: What Is Better? / I. A. Dyudyaev, V. V. Mayorova // LinguaNet: материалы IV Всерос. молодежной науч.-практ. конф. с междунар. участием (к 100-летию Ю. В. Кнорозова). – Севастополь, 2022. – С. 358–361.
10. **Лобикова, О. М.** Оценка жизненного цикла материалов в период окончания срока эксплуатации для ограждающих конструкций жилого здания / О. М. Лобикова, А. В. Субоч, Н. В. Сапранков // Информационное моделирование в задачах строительства и архитектуры : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. – СПб. : СПбГАСУ, 2024. – С. 16–21.
11. **Лобикова, О. М.** Цифровизация подготовки данных LCA для зеленого строительства / О. М. Лобикова, А. В. Субоч, Н. В. Сапранков // Экономика и бизнес в условиях цифровой трансформации и новых вызовов: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – М., 2024. – С. 62–74.
12. **Галюжин, С. Д.** Энергомоделирование зданий в условиях цифровой трансформации / С. Д. Галюжин, О. М. Лобикова // Экономика и бизнес: цифровая трансформация и перспективы развития: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – М., 2022. – С. 48–53.
13. **Субоч, А. В.** Анализ влияния строительных материалов на окружающую среду с использованием TALLY LCA / А. В. Субоч // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2024. – С. 145–146.
14. **Субоч, А. В.** Анализ жизненного цикла стройматериалов на основе BIM-модели для зеленого строительства / А. В. Субоч // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2024. – С. 147–148.
15. **Лобикова, О. М.** Методология комплексного подхода при проектировании энергоэффективных конструктивных решений / О. М. Лобикова, С. Д. Галюжин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2023. – С. 281–282.
16. **Сапранков, Н. В.** Многофакторная комплексная оценка проектов с учетом LCA / Н. В. Сапранков // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2024. – С. 138–139.

*Статья сдана в редакцию 1 ноября 2024 года*

Контакты:

olg.lobikova@yandex.by (Лобикова Ольга Михайловна);

linar0697@gmail.com (Субоч Ангелина Витальевна).

***O. M. LOBIKOVA, A. V. SUBOCH***

**MULTIFACTOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF PROJECTS WITH LCA CONSIDERATION**

**Abstract**

The article presents results of the analysis of various design options for the walls of a low-rise residential building. The calculations necessary for the design were made, and the life cycle assessment of materials (LCA) was performed. Based on the obtained results, petal diagrams were constructed and a comprehensive assessment of design options was done. A methodology for a multifactor comprehensive assessment of projects was developed, considering LCA (life cycle assessment of materials). This methodology can be recommended for use when choosing design solutions in low-rise housing construction to reduce the ecological impact of construction on the environment.

**Keywords:**

construction, life cycle assessment, building materials, carbon dioxide, enclosing structures.

**For citation:**

Lobikova, O. M. Multifactor comprehensive assessment of projects with LCA consideration / O. M. Lobikova, A. V. Suboch // *Belarusian-Russian University Bulletin*. – 2025. – № 1 (86). – P. 69–80.