

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЛЯЛЮК АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 699.86:658.5

ДИСЕРТАЦІЯ

**УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ПІДВИЩЕННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ
БУДІВЕЛЬ**

Спеціальність 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

Галузь знань 19 «Архітектура та будівництво»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А. О. Лялюк

Науковий керівник: Дудар Ігор Никифорович ,
доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2026

АНОТАЦІЯ

Лялюк А. О. Управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – «Будівництво та цивільна інженерія» галузь знань 19 – «Архітектура та будівництво» – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2026.

Актуальність теми зумовлена зростаючими вимогами до енергоефективності будівель як ключового напрямку сталого розвитку будівельної галузі. В умовах енергетичної нестабільності та посилення екологічних вимог особливої уваги приділяють зменшенню споживання паливно-енергетичних ресурсів при одночасному забезпеченні належних параметрів мікроклімату в приміщеннях. Вирішальну позицію у цьому процесі відіграють огорожувальні конструкції, від технічного стану та проектних рішень яких залежить рівень тепловтрат будівлі.

Підвищення енергоефективності можна досягнути під час удосконалення організаційно-технічних механізмів проектування, влаштування, експлуатації та термомодернізації огорожувальних конструкцій. Особливої актуальності набуває дослідження кількісних та якісних чинників на формування енергетичних показників будівель та їх систематизації на основі ієрархічної класифікації. Використання сучасних методів моделювання й інтелектуальної підтримки прийняття управлінських рішень дозволяє обґрунтувати оптимальні параметри теплоізоляційної оболонки з урахуванням економічних, технічних, організаційних та екологічних критеріїв. Для України проблема раціонального використання енергоресурсів є стратегічною, тому розроблення науково обґрунтованих підходів до управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій становить важливе науково-практичне значення.

Метою роботи є розроблення методологічних засад управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель, спрямованих на забезпечення відповідності сучасним вимогам енергозбереження, економічної доцільності та ефективності протягом життєвого циклу будівлі.

Об'єктом дослідження є процеси управління підвищенням енергоефективності огорожувальних конструкцій протягом життєвого циклу будівель.

Предметом дослідження є теоретико-методологічний інструментарій та моделі управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель.

Для реалізації поставленої мети в дисертаційній роботі визначено та вирішено комплекс наукових завдань, результати яких послідовно викладено у чотирьох розділах роботи.

У першому розділі сформульовано ключові вимоги до теплоізоляційної оболонки будівель, що зумовили вибір об'єкта дослідження - процесів управління підвищенням енергоефективності огорожувальних конструкцій протягом усього життєвого циклу. Показано, що дотримання сучасних вимог до огорожувальних систем забезпечує не лише скорочення енергоспоживання, а й належні умови комфорту для користувачів будівель. Проведено аналіз наукових підходів до вдосконалення організаційно-технічних рішень у сфері енергоощадності та обґрунтовано необхідність впровадження інноваційних технологій. Визначено доцільність застосування алгоритмізованого підходу до дослідження впливу організаційно-технічних чинників на енергетичні показники огорожувальних конструкцій.

Проаналізовано наявні методи математичного й фізичного моделювання витрат на реалізацію енергоефективних рішень та обґрунтовано потребу у формуванні критеріїв оцінки факторів впливу на процес управління підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій. Узагальнення практичного досвіду й результатів тепловізійних обстежень будівель засвідчило наявність відхилень теплофізичних характеристик огорожувальних конструкцій від нормативних вимог та окреслило причини теплових втрат. Встановлено причинно-наслідкові зв'язки, що зумовлюють теплові відмови огорожувальних конструкцій. Обґрунтовано необхідність використання багатофакторного та багатокритеріального аналізу для прийняття оптимальних управлінських рішень і створення основи для

подальшої систематизації та формалізації чинників впливу на енергоефективність будівель.

У другому розділі розроблено інструментарій управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій на основі теорії нечітких множин і лінгвістичних змінних. На відміну від традиційних підходів, запропонована модель забезпечує інтегральне врахування кількісних і якісних чинників, що впливають на прогнозовані сумарні енерговитрати теплоізоляційної оболонки протягом життєвого циклу будівлі. Цільовою функцією визначено мінімізацію сукупних витрат за умови забезпечення нормативного мікроклімату приміщень.

Сформовано узагальнену ієрархічну математичну модель управління у вигляді логічного дерева висновків, де фактори впливу класифіковано за рівнями взаємозв'язків. Ефективність управління підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій та відповідні чинники подано як лінгвістичні змінні з побудовою функцій належності, зокрема детально обґрунтовано методику їх формування для показника вологості. Моделювання процесу прийняття організаційно-технічних рішень реалізовано через систему правил «ЯКЩО–ТО» з подальшою дефазифікацією для отримання кількісних оцінок. Практична перевірка підтвердила достовірність результатів і доцільність використання розробленої експертно-моделюючої системи як інструменту інтелектуальної підтримки управління енергоефективністю огорожувальних конструкцій.

У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень конструктивно-технічних параметрів влаштування теплоізоляції огорожувальних конструкцій у контексті управління процесами підвищення їх енергоефективності. На основі планування багатофакторного експерименту встановлено закономірності впливу вологовмісту теплоізоляційного матеріалу на його теплопровідність та термічний опір конструкції. Отримані функції відгуку дозволяють обґрунтувати оптимальні параметри матеріалів з урахуванням умов улаштування та експлуатації теплоізоляційної оболонки.

Експериментально підтверджено, що зміна вологості під впливом технологічних і антропогенних чинників суттєво впливає на енергоефективність зовнішніх огорожувальних конструкцій. У ході натурних досліджень визначено розподіл температур у зразках мінеральної вати в умовах дії гомогенного теплового потоку та розраховано коефіцієнт теплопровідності за формулою Фур'є з урахуванням фактичної густини й вологості. Порівняльний аналіз засвідчив відхилення експериментальних значень від паспортних показників, що підтверджує необхідність урахування реальних експлуатаційних умов під час прийняття управлінських рішень щодо підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій.

У четвертому розділі обґрунтовано та експериментально підтверджено доцільність впровадження енергоощадних конструктивно-технічних рішень під час влаштування й термомодернізації непрозорих і світлопрозорих огорожувальних конструкцій будівель. Запропоновано інноваційні рішення стінових блоків, зокрема з використанням натуральної органічної сировини, а також удосконалені світлопрозорі системи з регулюванням теплових потоків, що забезпечують підвищення опору теплопередачі та зменшення тепловтрат.

Запропоновано організаційно-технічну модель управління процесами підвищення енергоефективності, яка охоплює всі етапи життєвого циклу проєкту - від аналітичної підготовки до контролю результатів. Запропоновані кібернетична та структурно-алгоритмічна моделі дають змогу обирати оптимальні рішення за критеріями приведених витрат, питомих тепловтрат і показників енергоефективності.

Техніко-економічне обґрунтування підтвердило зниження енергоспоживання та експлуатаційних витрат, а також досягнення нормативних показників мікроклімату. Отримані результати засвідчують практичну значущість розроблених підходів і доцільність їх застосування в системі управління підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель.

Наукова новизна полягає у вирішенні науково-прикладних задач управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель шляхом розвитку методів і моделей управління на основі інтеграції

експериментальних досліджень, багатофакторного математичного моделювання, експертно-аналітичних підходів.

Вперше:

- розроблено ієрархічну систему моделей управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій, яка поєднує організаційно-управлінські параметри, технічні рішення та теплоенергетичні показники будівель;
- створено експертно-аналітичну модель підтримки управлінських рішень у сфері підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій, що інтегрує результати експериментальних досліджень, математичного моделювання та експертних оцінок у єдиному інформаційно-аналітичному середовищі.

Удосконалено:

- методологію оцінювання та ідентифікації кількісної оцінки ключових чинників, що впливають на ефективність управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій за рахунок встановлення характеру та інтенсивності їхньої взаємодії в умовах багатофакторного впливу.

Набуло подальшого розвитку:

- систематизація факторів впливу на управлінські процеси підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель;
- методика інтелектуальної підтримки прийняття управлінських рішень у процесах підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій з урахуванням сучасних нормативних, технологічних та енергетичних вимог.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в освітньому процесі підготовки бакалаврів і магістрів у Вінницькому національному технічному університеті за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія», а також у практичну діяльність ТОВ «Подільський проектний інститут», що підтверджено відповідними актами впровадження (Додатки Д, Е).

Ключові слова: енергоефективність, тепло, вологовміст, огорожувальні конструкції, енергозбереження, теплоізоляційні матеріали, теплопровідність, термічний опір, лінгвістична змінна, фактори впливу, модель, нечіткий терм, експертна оцінка, термомодернізація.

ABSTRACT

Lialiuk A. O. Management of processes for increasing the energy efficiency of building envelopes. - Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 192 -“Construction and Civil Engineering” field of knowledge 19 - “Architecture and Construction” - Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2026.

The relevance of the topic is due to the growing requirements for energy efficiency of buildings as a key direction of sustainable development of the construction industry. In conditions of energy instability and increased environmental requirements, special attention is paid to reducing the consumption of fuel and energy resources while ensuring the proper microclimate parameters in the premises. Enclosing structures play a decisive role in this process, the level of heat loss of the building depends on the technical condition and design solutions of which.

Increasing energy efficiency can be achieved by improving the organizational and technical mechanisms for the design, installation, operation and thermal modernization of enclosing structures. The study of quantitative and qualitative factors in the formation of energy indicators of buildings and their systematization based on hierarchical classification is of particular relevance. The use of modern modeling methods and intellectual support for making management decisions allows us to substantiate the optimal parameters of the thermal insulation shell taking into account economic, technical, organizational and environmental criteria. For Ukraine, the problem of rational use of energy resources is strategic, therefore, the development of scientifically based approaches to managing the processes of increasing the energy efficiency of building envelopes is of important scientific and practical importance.

The purpose of the work is to develop methodological principles for managing the processes of increasing the energy efficiency of building envelopes, aimed at ensuring compliance with modern requirements for energy saving, economic feasibility and efficiency throughout the life cycle of the building.

The object of the study is the processes of managing the energy efficiency of building envelopes during the life cycle of buildings.

The subject of the study is the theoretical and methodological tools and models of managing the processes of increasing the energy efficiency of building envelopes.

To achieve the set goal, a set of scientific tasks has been identified and solved in the dissertation work, the results of which are consistently presented in four sections of the work.

The first section formulates the key requirements for the thermal insulation shell of buildings, which determined the choice of the object of the study - the processes of managing the energy efficiency of building envelopes throughout the life cycle. It is shown that compliance with modern requirements for building envelope systems provides not only a reduction in energy consumption, but also proper comfort conditions for building users. An analysis of scientific approaches to improving organizational and technical solutions in the field of energy saving was conducted and the need for the introduction of innovative technologies was substantiated. The feasibility of using an algorithmic approach to studying the impact of organizational and technical factors on the energy performance of building envelopes was determined.

The existing methods of mathematical and physical modeling of costs for implementing energy-efficient solutions were analyzed and the need for the formation of criteria for assessing the factors influencing the management process of increasing the energy efficiency of building envelopes was substantiated. The generalization of practical experience and the results of thermal imaging surveys of buildings confirmed the presence of deviations in the thermophysical characteristics of building envelopes from regulatory requirements and outlined the causes of heat losses. Cause-effect relationships that cause thermal failures of building envelopes were established. The need for using multifactor and multicriteria analysis to make optimal management decisions and create a basis for further systematization and formalization of factors influencing the energy efficiency of buildings is substantiated.

In the second section, a toolkit for managing processes of increasing the energy efficiency of building envelopes is developed based on the theory of fuzzy sets and linguistic variables. Unlike traditional approaches, the proposed model provides an integrated consideration of quantitative and qualitative factors that affect the predicted total energy

consumption of the thermal insulation shell during the life cycle of the building. The objective function is defined as minimizing total costs while ensuring the normative microclimate of the premises.

A generalized hierarchical mathematical management model is formed in the form of a logical conclusion tree, where the influencing factors are classified by levels of relationships. The effectiveness of management of increasing the energy efficiency of enclosing structures and the corresponding factors are presented as linguistic variables with the construction of membership functions, in particular, the methodology for their formation for the humidity indicator is substantiated in detail. The modeling of the process of making organizational and technical decisions is implemented through the system of rules "IF-THET" with subsequent defuzzification to obtain quantitative estimates. Practical testing confirmed the reliability of the results and the feasibility of using the developed expert modeling system as an intellectual support tool.

The third section presents the results of experimental studies of the structural and technical parameters of the thermal insulation of building envelopes in the context of managing the processes of increasing their energy efficiency. Based on the planning of a multifactor experiment, the regularities of the influence of the moisture content of the insulation material on its thermal conductivity and thermal resistance of the structure were established. The obtained response functions allow us to substantiate the optimal parameters of the materials, taking into account the conditions of the installation and operation of the thermal insulation shell.

It has been experimentally confirmed that the change in humidity under the influence of technological and anthropogenic factors significantly affects the energy efficiency of external building envelopes. During field studies, the temperature distribution in mineral wool samples under the influence of a homogeneous heat flow was determined and the thermal conductivity coefficient was calculated using the Fourier formula, taking into account the actual density and humidity. A comparative analysis showed a deviation of experimental values from the passport indicators, which confirms the need to take into account real operating conditions when making management decisions to increase the energy efficiency of building envelopes.

The fourth section substantiates and experimentally confirms the feasibility of implementing energy-saving structural and technical solutions during the installation and thermal modernization of opaque and translucent building envelopes. Innovative solutions for wall blocks are proposed, in particular using natural organic raw materials, as well as improved translucent systems with heat flow regulation, which provide increased heat transfer resistance and reduced heat loss.

An organizational and technical model for managing energy efficiency processes is proposed, which covers all stages of the project life cycle - from analytical preparation to results control. The proposed cybernetic and structural-algorithmic models allow choosing optimal solutions based on the criteria of reduced costs, specific heat losses and energy efficiency indicators.

The feasibility study confirmed the reduction in energy consumption and operating costs, as well as the achievement of regulatory microclimate indicators. The results obtained demonstrate the practical significance of the developed approaches and the feasibility of their application in the management system for increasing the energy efficiency of building envelopes.

The scientific novelty lies in solving scientific and applied problems of managing the processes of increasing the energy efficiency of building envelopes by developing management methods and models based on the integration of experimental research, multifactor mathematical modeling, and expert and analytical approaches.

For the first time:

- a hierarchical system of management models for increasing the energy efficiency of building envelopes has been developed, which combines organizational and management parameters, technical solutions, and thermal energy indicators of buildings;
- an expert and analytical model for supporting management decisions in the field of increasing the energy efficiency of building envelopes has been created, which integrates the results of experimental research, mathematical modeling, and expert assessments in a single information and analytical environment.

Improved:

- methodology for assessing and identifying the quantitative assessment of key factors that affect the effectiveness of managing processes for increasing the energy efficiency of building envelopes by establishing the nature and intensity of their interaction under conditions of multifactorial influence.

Further development was achieved:

- systematization of factors influencing the management processes for increasing the energy efficiency of building envelopes;
- methodology for intellectual support of management decision-making in processes for increasing the energy efficiency of building envelopes, taking into account modern regulatory, technological and energy requirements.

The results of the dissertation work were implemented in the educational process of training bachelors and masters at Vinnytsia National Technical University in specialty 192 "Construction and Civil Engineering", as well as in the practical activities of Podolsk Design Institute LLC, which is confirmed by the relevant implementation acts (Appendices D, E).

Keywords: energy efficiency, heat, moisture content, building envelopes, energy saving, thermal insulation materials, thermal conductivity, thermal resistance, linguistic variable, influence factors, model, fuzzy term, expert assessment, thermal modernization.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лялюк А. О., Лялюк О. Г. Шляхи забезпечення зростання фінансування інновацій в будівництві: *матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Енергоефективність в галузях економіки України»*. (м. Вінниця, 5 жовт. 2017.). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2017/paper/viewFile/3397/2847>
2. Лялюк А. О., Лялюк О.Г. Класифікація факторів впливу на вибір фінансового механізму енергозберігаючого проекту: *матеріали XLVII наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ*. (м. Вінниця, черв. 2018.). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/index/pages/view/zbirn2018>
3. Лялюк А. О., Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С. Моделювання теплотехнічних параметрів багатошарових огорожувальних конструкцій із теплоізоляційних матеріалів органічного походження: *матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в будівництві»*. (м. Вінниця, листопад 2018). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-ebmd/itb2018/paper/view/6142/5121>
4. Лялюк А. О., Панкевич В. В., Ратушняк О. Г., Лялюк О. Г. Управління факторами, які впливають на вибір фінансового механізму енергозберігаючого проекту. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2018. Т.24. № 1. С. 94–100. URL: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/607077>
5. Лялюк А. О., Лялюк О.Г. Оцінка ризиків енергозберігаючого проекту: *матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в будівництві»*. (м.Вінниця, листопад 2018). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2018/paper/viewFile/5973/4952>
6. Лялюк А. О., Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С. Моделювання теплопередачі через зовнішній багатошаровий солом'яний стіновий блок. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2018. Т.24. № 1. С. 50–55. URL: <https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/555/535>.
7. Ратушняк О. Г., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Управління фінансовими механізмами з реалізації енергозберігаючих проектів: колект. монографія «Соціально-економічні засади формування та функціонування економіки України» за

заг. ред. О. О. Непочатенко, д.е.н., проф. Умань: Видавець Сочінський М. М., 2019. 276 с. (С. 75 – 80). ISBN 978-966-304-287-9

8. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Ущільнення матеріалів рослинного походження при виготовленні теплоізоляційних будівельних матеріалів: *матеріали XLVIII наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ*. (м. Вінниця, черв. 2019.). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2019/paper/view/7050/5726>
9. Ратушняк Г. С., Лялюк А. О., Бікс Ю. С. Алгоритм реалізації проєкта управління імовірністю теплової відмови теплоізоляційної оболонки будівлі. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2019. Т.26. № 1. С. 140 – 146. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-1-140-146>
10. Лялюк А. О., Лялюк О. Г. Застосування екомаркетингу в будівництві: *тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. «Енергоефективність в галузях економіки України»*. (м.Вінниця, листопад 2019). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2019/paper/view/8255>.
11. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Лялюк А. О. Зовнішній стіновий теплозвукоізоляційний блок: МПК Е04С 2/10. пат. 121651 Україна; заявл. 26.06.2017; опубл. 11.12.2017. Бюл. №23.
12. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Лялюк А. О. Каркасна стінова панель із теплозвукоізоляційних солом'яних блоків: Е04В 2/00, Е04В 1/74, Е04С 2/00. пат. 127505 Україна; заявл. 15.02.2018; опубл. 10.08.2018. Бюл. № 15.
13. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Коц І. В., Лялюк А. О. Установка для виготовлення солом'яних блоків заданої щільності та геометричних розмірів: пат. 128148 Україна; заявл. 26.03.2018; опубл. 10.09.2018. Бюл. № 17.
14. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Тітко О. В., Лялюк А. О. Багатошаровий теплоізоляційний стіновий блок: Е04С 1/40, Е04В 2/00. пат. 130548 Україна; заявл. 11.06.2018; опубл. 10.12.2018. Бюл. № 23.
15. Лялюк А. О., Лялюк О. Г. Моделювання системи прийняття конструктивно-технічних рішень вибору енергозберігаючого покриття будівлі. *Сучасні*

- технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2019. Т.27. № 2. С. 145–154. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-145-154>.
- 16.Лялюк А. О., Бікс Ю. С. Використання методик багатокритеріального аналізу в галузі енергоефективності: *тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в будівництві»*. (м.Вінниця, листопад 2020). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2020/paper/view/10794>.
- 17.Biks Y., Ratushnyak G., Ratushnyak O., Lyalyuk A. Energy efficiency assessment of heat insulation building products: fuzzy-probabilistic approach. *Architecture, Civil Engineering and Environment*. 2021. Vol. 14(1). P. 59–68. (Web of Science, ISSN 1899-0142). URL: <https://doi.org/10.21307/acee-2021-006>
- 18.Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Ратушняк О. Г., Лялюк А. О. Установка для дослідження теплопровідності енергоефективних теплоізоляційних матеріалів рослинного походження. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2020. Т. 28, № 1. С. 100–107. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-1-100-107>.
- 19.Ратушняк Г. С., Горюн О. Ю., Лялюк А. О. Моделювання теплопередавання у вузлі примикання віконного блоку до зовнішньої стіни. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Т. 29, № 2. 2020. С. 113–118. 6 с. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-2-113-118>.
- 20.Biks Y., Ratushnyak G., Ratushnyak O., Lyalyuk A. Thermal Performance Assessment of wall assemblies: Criteria Importance Theory and AHP approach. *Civil Engineering Journal*. 2022. Vol. 31(2). P. 235–248. URL : DOI:10.14311/CEJ.2022.02.0018
- 21.Бікс Ю. С., Ратушняк О. Г., Лялюк А. О. Комплексна оцінка потенціалу енергоефективності багат шарових огорожувальних конструкцій стін: *матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Енергозбереження в будівництві»*. (м. Вінниця, 24 лист. 2021.). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2021/paper/viewFile/14065/11907>
- 22.Дудар І. Н., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Шляхи утеплення складних поверхонь: *матеріали 51-ї наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ*. (м.Вінниця, берез. 2022.).

URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2022/paper/view/15266>.

23. Ратушняк Г. С., Гончарук В. С., Лялюк А. О. Енергетична ефективність теплозахисту огорожувальних конструкцій будівель: *матеріали 51-ї наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ*. (м. Вінниця, берез. 2022). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2022/paper/view/14866>.
24. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Лялюк А. О. Експериментальні дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів із мінеральної вати. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Т. 32, № 1. 2022. С. 43–48. URL: doi 10.31649/2311121429-2022-1-43-48
25. Zhang H., Lyalyuk O., Lyalyuk A. The use of modern materials in the construction of external walls of energy-efficient buildings: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в будівництві». (м. Вінниця, 23 листоп. 2022). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2022/paper/view/16682>.
26. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Лялюк А. О. Методи моделювання організаційно-технологічного забезпечення рішень з удосконалення теплоізоляційної оболонки будівель: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в будівництві». (м. Вінниця, листопад 2022). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2022/paper/viewFile/16617/13847>.
27. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Лялюк А. О. Організаційно-технологічні чинники впливу на енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Т. 33, № 2, 2022. С. 203–210. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-2-203-210>
28. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Ратушняк О. Г., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Світлопрозора огорожувальна конструкція: пат. 154989 UA, № u 202302044; заявл. 01.05.2023; опубл. 10.01.2024, Бюл. № 2. – 4 с. : кресл.
29. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Моніторинг та експертно-аналітична оцінка надійності теплоізоляційної оболонки будівель. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2023. Т.34. № 1. С. 140–145. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-1-140-145>

- 30.Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Інформаційне забезпечення моделювання теплотехнічних параметрів огорожувальних конструкцій з використанням методів багатокритеріального аналізу: *тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. «Енергоефективність в галузях економіки України-2023»*. (м. Вінниця, 23 листоп. 2023). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egcu/egcu2023/paper/view/19050>
- 31.Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Формалізація та ієрархічна класифікація параметрів впливу на енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2023. Т. 35. № 2. С. 98–103. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-2-98-103>
- 32.Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Моделювання енергетичної ефективності огорожувальних конструкцій будівель з використанням функцій належності: *матеріали 53-ї наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ*. (м. Вінниця, берез. 2024). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2024/paper/view/20439/16916>.
- 33.Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Ратушняк Д. А., Лялюк А. О. Моделювання системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень з оцінювання енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель з використанням лінгвістичних змінних. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2024. Т.36. № 1. С. 91–95. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-91-95>
- 34.Biks Y., Wan Z., Lyalyuk O., Lyalyuk A. Management model for the construction's waste use in walls manufacturing. *Architecture, Civil Engineering and Environment*. 2024. Vol. 17(2). P. 87–99. (Web of Science, ISSN 1899-0142). URL: <https://doi.org/10.2478/acee-2024-0015>
- 35.Лялюк О. Г., Опря Є. М., Лялюк А. О. Сучасний стан і проблеми, пов'язані з процесом улаштування енергозберігаючого покриття будівлі та шляхи їх вирішення: *матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Енергоефективність в галузях економіки України-2024»*. (м. Вінниця, 20 листоп. 2024). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2024/paper/viewFile/22636/18691>.

- 36.Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Функції належності нечітких оцінок впливу визначальних параметрів на прогнозовану енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель: *матеріали V-ї міжнар. наук.-практ. конф. «Енергія. Ресурси. Екологія – багатофункціональні еко- та енергоефективні, ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях»*. (м. Київ, 27–29 листоп. 2024). С. 31–32. URL: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/ere-2024-ua.pdf>.
- 37.Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Дослідження теплопровідності теплоізоляційного матеріалу з врахуванням вологовмісту: *матеріали III Всеукр. наук. конф. здобувачів освіти і молодих учених. «Відбудова транспортної інфраструктури України»*. (м. Київ. 2025). С. 72. ISBN: 978-966-632-331-9 URL: https://drive.google.com/file/d/1rYmW-l8i9qIM0yGFqKIntPD0SmWiq_iI/view
- 38.Дудар І. Н., Опря Є. М., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Оцінка стану організаційно-технологічних рішень у сфері облаштування, експлуатації та термомодернізації покриттів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2024. Т.37. № 2. С. 181–192. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-2-181-192>
- 39.Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Ратушняк О. Г., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Світлопрозора огорожувальна конструкція: пат. 157760 UA, № u 202401845; заявл. 10.04.2024; опубл. 21.11.2024, Бюл. № 47. – 3 с. : кресл.
- 40.Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Дослідження впливу вологовмісту теплоізоляційного матеріалу на його теплопровідність: *матеріали LIV Всеукр. наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ* (м.Вінниця, березень 2025). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2025/paper/view/23693/19568>.
- 41.Ратушняк Г. С. Лялюк А. О. Експертне оцінювання енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель нечіткими множинами та лінгвістичними змінними. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. Київ, 2025. Вип. 52. С. 85–96. URL: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.52.85-96>
- 42.Опря Є. М., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Optimization of thermal modernization technologies for building coverings to improve energy efficiency and thermal insulation

properties: матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф. *Future of Science: Innovations and Perspectives* . (м. Стокгольм (Швеція), 21–23 квітня 2025). 2025. С. 119–123. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2025/04/FUTURE-OF-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PERSPECTIVES-21-23.04.25.pdf>.

43.Лялюк О. Г., Опря Є. М., Лялюк А. О. Удосконалення теплоізоляційних властивостей енергозберігаючого покриття будівлі. *Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи. ВНТУ. Вінниця.* 2025. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/schedConf/presentations?track=948>.

44.Лялюк А. О. Планування багатофакторного експерименту при дослідженні впливу вологовмісту теплоізоляційного матеріалу на його теплопровідність. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві.* 2025. Т.39. № 2. С. 149–155. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2025-2-149-155>.

45.Опря Є. М., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Аналіз фізичних та математичних моделей організаційно-технологічного забезпечення рішень з удосконалення теплоізоляційних властивостей енергозберігаючого покриття будівлі: *матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Енергоефективність в галузях економіки України-2025».* (м. Вінниця, 20 лист. 2025). С. 225–228. ISBN: 978-617-8163-73-0; URL: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/939/1636/2956-1>.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1_СУЧАСНИЙ СТАН І ПРОБЛЕМИ, ПОВ’ЯЗАНІ З ПРОЦЕСОМ УЛАШТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДИНКУ ТА ШЛЯХИ ЇХ ВИРІШЕННЯ	30
1.1 Основні вимоги до огороджувальних конструкцій будинку.....	30
1.2 Аналіз наукових розробок з удосконалення організаційно-технічних рішень підвищення енергоефективності теплоізоляційної оболонки будівель	31
1.3 Практичний досвід організаційно-технічних рішень підвищення енергоефективності огороджувальних конструкцій будівель	39
1.4 Аналіз фізичних та математичних моделей організаційно-технічного забезпечення рішень з удосконалення теплоізоляційних властивостей огороджувальних конструкцій будівель	46
Висновки до розділу 1	53
РОЗДІЛ 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ.....	56
2.1 Моніторинг визначення концепцій підвищення енергетичної надійності теплоізоляційної оболонки будівель	56
2.3 Моделювання багатофакторіального процесу оцінювання організаційно- технічних рішень підвищення енергоефективності огороджувальних конструкцій	65
2.3.1 Формалізація та ієрархічна класифікація факторів впливу на енергоефективність огороджувальних конструкцій будівель	65
2.3.2 Побудова функцій належності нечітких оцінок впливу факторів.	72
2.3.3 Моделювання системи прийняття рішень на системному рівні	82
2.3.4 Моделювання системи прийняття рішень з урахуванням організаційних факторів	84
2.3.5 Моделювання системи прийняття рішень з урахуванням технічних факторів	89
2.4 Розроблення аналітичних моделей функцій належності для оцінювання вхідних змінних, які визначають процес прийняття організаційних-технічних рішень	96

2.5 Дефазифікація та перевірка достовірності результатів моделювання.....	105
Висновки до розділу 2	110
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВЛАШТУВАННЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ	
112	
3.1 Планування багатофакторного експерименту з дослідження впливу вологовмісту теплоізоляційного матеріалу на його теплопровідність.....	112
3.2 Експериментальні дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів із мінеральної вати	118
Висновки до розділу 3	122
РОЗДІЛ 4	123
РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЇХ ВПРОВАДЖЕННЯ ПІД ЧАС ВЛАШТУВАННЯ ТА ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЇ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ	
123	
4.1 Енергоощадні конструктивно-технічні рішення вдосконалення теплозахисту огорожувальних конструкцій будівель	123
4.2 Управління організаційно-технічним бізнес-процесом підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель	128
Висновки до розділу 4	137
ВИСНОВКИ	139
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	142
ДОДАТКИ	161

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ОТР – організаційно-технічні рішення.

ЛЗ - лінгвістична змінна.

КМУП - кібернетична модель управління проєктами.

ДСТУ – Державний стандарт України.

ДБН – Державні Будівельні Норми.

ЄС – Європейський Союз.

ТОВ – товариство з обмеженою відповідальністю.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Енергоефективність будівель є одним із пріоритетних напрямів сучасного будівництва, спрямованого на зменшення споживання енергоресурсів та зниження негативного впливу на довкілля. Важливу роль у забезпеченні енергоефективності відіграють огорожувальні конструкції будинку, які включають зовнішні стіни, покрівлі, вікна, двері та інші елементи теплоізоляційної оболонки будівлі.

В умовах посилення енергетичної кризи та ускладнення екологічної ситуації суттєвою проблемою сьогодення є зменшення енергоспоживання виходячи з принципу максимальна енергетична ефективність будівель при мінімальних сумарних затратах енергії на протязі їхнього життєвого циклу. Вирішення проблеми підвищення енергоефективності будівель неможливе без удосконалення їхньої теплоізоляційної оболонки як системи огорожувальних конструкцій для забезпечення оптимальних санітарно-гігієнічних умов в приміщеннях.

Управління та організація процесами підвищення енергоефективності будівель передбачає вдосконалення організаційно-технічних механізмів їхньої комплексної реалізації. Це буде сприяти енергоощадному використанню енергоресурсів та зниженню негативних впливів на довкілля, що дозволить розв'язати низку соціально-економічних проблем, особливо при будівництві нового та реконструкції існуючого житла на засадах біосферосумісництва.

Актуальним завданням сьогодення зі зменшення енергоспоживання при забезпеченні оптимальних параметрів мікроклімату в приміщеннях є подальше дослідження впливу організаційно-технічних чинників на енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель. Одним із шляхів вирішення цієї задачі є залучення сучасних методів моделювання інтелектуальної підтримки прийняття рішень управління параметрами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій, що забезпечують енергоощадність будівель за період їхнього життєвого циклу. Це потребує систематизації та ієрархічної класифікації кількісних та якісних

чинників впливу на цільову функцію, якою є енергоощадність будинку, що залежить від енергоефективності огорожувальних конструкцій.

Загальна національна проблема України є економія паливно-енергетичних ресурсів для створення комфортності перебування людей у приміщеннях, а підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель на всіх етапах життєвого циклу є однією із першочергових задач при проєктуванні, влаштуванні, експлуатації та термомодернізації будівель.

Питаннями енергозбереження огорожувальних конструкцій займалися вчені Семко В. О., Желих В. М., Пічугін С. Ф., Меньлюк О. І., Нетеса К., Кучеренко Л. В., Дудар І. Н., Дзеджула В.В., Фаренюк Г. Г., Климчук М.М., Предун К. М., Мілейковський В. О., Полив'янчук А. П., Панкевич О.Д. та інші.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами

Тема дисертаційної роботи відповідає сучасним вимогам національної політики України з питань енергозбереження та енергоощадження, визначеними такими документами: Закону України «Про енергетичну ефективність» зі змінами від 3 грудня 2025 року № 4695-IX, Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» зі змінами від 21 грудня 2023 року № 3534-IX та плану держбюджетних науково-дослідних досліджень кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету темі 63К9 «Підвищення енергоефективності будівельних матеріалів і виробів».

Мета та завдання дослідження.

Метою роботи є розроблення методологічних засад управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель, спрямованих на забезпечення відповідності сучасним вимогам енергозбереження, економічної доцільності та ефективності протягом життєвого циклу будівлі.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі визначено та вирішено такі **завдання**:

- 1) провести аналітичне дослідження, узагальнення та оцінювання сучасного стану процесів управління влаштуванням і термомодернізацією огорожувальних конструкцій будівель, визначити напрями їхнього удосконалення та розвитку;
- 2) за результатами моніторингу концепцій експериментально-аналітичних моделей підвищення надійності теплоізоляційної оболонки будівель визначити фактори впливу на енергетичну ефективність огорожувальних конструкцій будівель та здійснити їхню формалізацію та ієрархічну класифікацію;
- 3) розробити ієрархічну систему математичних моделей управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій з урахуванням організаційно-технічних впливів;
- 4) розробити експертно-моделюючу систему інтелектуальної підтримки управління підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій;
- 5) експериментально дослідити теплофізичні параметри теплоізоляційних матеріалів та ефективність технічних рішень огорожувальних конструкцій як інформаційну основу для прийняття управлінських рішень;
- 6) розробити інноваційні технічні рішення вдосконалення огорожувальних конструкцій будівель та обґрунтувати доцільність використання запропонованого інструментарію управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель.

Об'єктом дослідження є процеси управління підвищенням енергоефективності огорожувальних конструкцій протягом життєвого циклу будівель.

Предметом дослідження є теоретико-методологічний інструментарій та моделі управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель.

Методи досліджень: методи системного аналізу, формалізації та синтезу (для формування передумов, припущень та гіпотез під час розроблення імітаційних моделей та методик), методи експертних оцінок (для відбору визначальних факторів впливу на енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель), методи теорії ймовірності та математичної статистики (для перевірки достовірності експертних

оцінок, для відбору і аналізу вихідних даних, визначення закономірностей впливу кількісних та якісних факторів на цільову функцію та обґрунтування достовірності отриманих результатів), теорія нечітких множин та лінгвістичних змінних (для моделювання багатофакторіального процесу інтелектуальної підтримки під час оцінювання організаційно-технічних рішень підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій), методи організаційно-технічного моделювання управлінських процесів та теорія прийняття рішень (для розроблення методології управління процесами підвищення енергоефективності та обґрунтування доцільності їхнього впровадження).

Інформаційною базою досліджень є інформаційні джерела, які характеризують енергозберігаючу та енергоефективну діяльність будівельної галузі, національні законодавчі та нормативні акти.

Наукова новизна полягає у вирішенні науково-прикладних задач управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель шляхом розвитку методів і моделей управління на основі інтеграції експериментальних досліджень, багатофакторного математичного моделювання, експертно-аналітичних підходів.

Вперше:

- розроблено ієрархічну систему моделей управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій, яка поєднує організаційно-управлінські параметри, технічні рішення та теплоенергетичні показники будівель;
- створено експертно-аналітичну модель підтримки управлінських рішень у сфері підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій, що інтегрує результати експериментальних досліджень, математичного моделювання та експертних оцінок у єдиному інформаційно-аналітичному середовищі.

Удосконалено:

- методологію оцінювання та ідентифікації кількісної оцінки ключових чинників, що впливають на ефективність управління процесами підвищення

енергоефективності огорожувальних конструкцій за рахунок встановлення характеру та інтенсивності їхньої взаємодії в умовах багатофакторного впливу.

Набуло подальшого розвитку:

- систематизація факторів впливу на управлінські процеси підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель;
- методика інтелектуальної підтримки прийняття управлінських рішень у процесах підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій з урахуванням сучасних нормативних, технологічних та енергетичних вимог.

Практичне значення одержаних результатів та впровадження результатів роботи

Результати теоретичних досліджень і наукові висновки, отримані в межах дисертаційної роботи, реалізовано у вигляді конкретних методичних рекомендацій і практичних рішень, призначених для використання у проєктній, дослідницькій та експлуатаційній діяльності у сфері підвищення енергоефективності будівель, зокрема:

- запропоновано методологію управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій із використанням апарату нечіткої логіки та лінгвістичних змінних для оцінювання факторів впливу на системному рівні та рівні прийняття управлінських рішень;
- розроблено та запропоновано інноваційні технічні рішення непрозорих і світлопрозорих огорожувальних конструкцій, які можуть бути використані як інструменти реалізації управлінських рішень у сфері підвищення енергоефективності будівель і сприяти покращенню теплоізоляційної оболонки будівлі (отримані патенти на корисну модель № 121651, №127505, №128148, №130548, №154989, №157760).

Впровадження основних результатів роботи

- Отримані результати можуть бути використані в освітньому процесі під час підготовки бакалаврів і магістрів у Вінницькому національному технічному університеті (додаток Е).
- У практичну діяльність проєктно-дослідної організації будівельної галузі (ТОВ «Подільський проєктний інститут», що підтверджено відповідними актами

впровадження, додаток Д).

- Новизна та практична цінність запропонованих рішень підтверджено 6 патентами на корисну модель.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійною кваліфікаційною науковою працею, у якій на основі авторських наукових досліджень обґрунтовано та розвинено теоретико-методичні положення методики прийняття рішень щодо вибору вдосконалення організаційно-технічних рішень підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель. Особистий внесок здобувача у наукових працях, опублікованих у співавторстві та наведених у переліку публікацій за темою дисертаційного дослідження, полягає у наступному: в роботі [4] - розроблена методика оцінки факторів впливу на вибір фінансового механізму енергозберігаючого проєкту на основі апарату нечіткої логіки, яка враховує кількісні та якісні фактори впливу на управлінські рішення; в роботі [6] – встановлено, що найбільші значення приведенного опору теплопередачі для запропонованого конструктивного виконання зовнішнього багат шарового теплозвукоізоляційного блоку при співвідношенні максимальна товщина спресованої соломи та найменша її теплопровідність, а найменші значення при співвідношенні мінімальної товщини спресованої соломи до максимальної її теплопровідності; в роботі [7] – систематизована класифікація показників для оцінки фінансового механізму енергозберігаючого проєкту; в роботі [9] – запропоновано структурно-логічну модель з реалізації проєкту щодо управління заходами із забезпечення теплової надійності огорожувальних конструкцій; в роботі [15] - виконано оцінку рівнів лінгвістичних змінних, які встановлюють зв'язок між факторами впливу; в роботі [17] - запропоновано систему нечітких логічних рівнянь, яка описує лінгвістичні вирази вхідних змінних відповідно до відповідних термінів; в роботі [18] - запропоновано оригінальну конструкцію установки, яка створює гомогенний тепловий потік, для дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів; в роботі [19] - запропоновано удосконалене конструктивне виконання вузла примикання віконного блоку до зовнішньої стіни для підвищення термічного опору; в роботі [20] – визначено інтегральний показник теплових характеристик методом аналітичного

ієрархічного процесу для різних типів стінових конструкцій з природного матеріалу; в роботі [24] – відповідно до планування натурного експерименту в розробленій установці визначено характер розподілу температури в різних точках зразка мінеральної вати, що розміщена в кліматичній камері, до якої надходить гомогенний тепловий потік; в роботі [27] - запропоновано алгоритм дослідження чинників впливу на прийняття управлінських рішень при виборі оптимального шляху їх реалізації; в роботі [29] - проаналізовано сучасний стан досліджень з моніторингу та експертно-аналітичної оцінки надійності теплоізоляційної оболонки будівель; в роботі [31] – запропоновано ієрархічну класифікацію та формалізацію параметрів впливу на енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель, які є нечіткою базою знань, що поєднують лінгвістичні оцінки вхідних і вихідних чинників, що впливають на цільову функцію; в роботі [33] - запропоновано структуру ієрархічної нейро-нечіткої мережі, яка відповідає дереву логічного висновку стосовно енергоефективності огорожувальних конструкцій; в роботі [34] – запропоновано ієрархічна система математичних моделей, яка дозволяє вибирати відповідний будівельний матеріал залежно від впливу параметрів навколишнього середовища, соціально-економічних параметрів та інженерно-технологічних параметрів будівельного об'єкта, на основі нечітких логічних виразів «ЯКЩО-ТО»; в роботі [38] - визначено ключові проблеми та недоліки в реалізації термомодернізаційних заходів, а також досліджено вплив організаційно-технічних факторів на якість і довговічність покриттів; в роботі [41] – запропоновано складові експертно-моделюючої системи інтелектуальної підтримки прийняття організаційно-технологічних рішень щодо підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель.

Публікації. За темою дисертації з викладенням її основного змісту опубліковано 45 праць, в т. ч.: 3 статті у «Web of Science»; 13 статей у наукових фахових виданнях України; 6 патентів на корисну модель; 23 тез доповідей конференцій різного рівня.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційного дослідження, а також сформульовані на їх основі наукові положення, були оприлюднені та пройшли наукову апробацію під час проведення таких наукових конференцій: Міжнародна

науково-практична конференція «Енергоефективність в галузях економіки України-2025» (м. Вінниця, 20 листопада 2025 р.), Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (м. Вінниця, 2025 р.), VI міжнародна науково-практична конференція «Future of Science: Innovations and Perspectives» (Стокгольм, Швеція, 21–23 квітня 2025 р.), LIV Всеукраїнська науково-технічна конференція співробітників ВНТУ (м. Вінниця, березень 2025 р.), III Всеукраїнська науково-технічна конференція здобувачів освіти і молодих учених. Відбудова транспортної інфраструктури України. (м. Київ, березень 2025 р.), V міжнародна науково-практична конференція «Енергія. Ресурси. Екологія – багатофункціональні еко- та енергоефективні, ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях» (м. Київ, 27–29 листопад 2024 р.), Міжнародна науково-практична конференція «Енергоефективність в галузях економіки України-2024» (м. Вінниця, 20 листопад 2024 р.), 53 науково-технічна конференція підрозділів ВНТУ (м. Вінниця, березень 2024), Міжнародна науково-практична конференція «Енергоефективність в галузях економіки України-2023» (м. Вінниця, 23 листопад 2023 р.), Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні технології в будівництві» (м. Вінниця, 23 листопад 2022 р.), Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні технології в будівництві» (м. Вінниця, 23 листопад 2022), 51 науково-технічна конференція підрозділів ВНТУ (м. Вінниця, березень 2022 р.), Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження в будівництві» (м. Вінниця, 24 листопад 2021 р.), Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні технології в будівництві» (м. Вінниця, листопад 2020 р.), Міжнародна науково-практична конференція «Енергоефективність в галузях економіки України» (м. Вінниця, листопад 2019 р.), XLVIII науково-технічна конференція підрозділів ВНТУ (м. Вінниця, червень 2019 р.), Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні технології в будівництві» (м. Вінниця, листопад 2018 р.), XLVII науково-технічна конференція підрозділів ВНТУ (м. Вінниця, червень 2018 р.), Міжнародна науково-практична конференція «Енергоефективність в галузях економіки України» (м. Вінниця, 5 жовтня 2017.).

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН І ПРОБЛЕМИ, ПОВ'ЯЗАНІ З ПРОЦЕСОМ УЛАШТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДИНКУ ТА ШЛЯХИ ЇХ ВИРІШЕННЯ

1.1 Основні вимоги до огорожувальних конструкцій будинку

Енергоефективність будівель є одним із пріоритетних напрямів сучасного будівництва, спрямованого на зменшення споживання енергоресурсів та зниження негативного впливу на довкілля. Важливу роль у забезпеченні енергоефективності відіграють огорожувальні конструкції будинку, які включають зовнішні стіни, покрівлі, вікна, двері та інші елементи теплоізоляційної оболонки будівлі. Проаналізувавши фактори впливу на енергоефективність можна виділити наступні вимоги до огорожувальних конструкцій:

1. Вимоги до теплоізоляції. Одним із ключових показників енергоефективності огорожувальних конструкцій є їх теплозахисні властивості [1]. Основні вимоги до теплоізоляції включають:

- **Низький коефіцієнт теплопровідності матеріалів** - вибір матеріалів із мінімальною теплопровідністю дозволяє зменшити тепловтрати [2].
- **Забезпечення герметичності** - всі стики та шви повинні бути ізольовані для запобігання тепловим місткам.
- **Оптимальна товщина теплоізоляції** відповідно до кліматичних умов регіону та нормативних вимог.

2. Вимоги до повітропроникності та пароізоляції. Для запобігання накопиченню вологи всередині конструкцій необхідно дотримуватись таких вимог:

- **Контроль повітропроникності** - зменшення неконтрольованих повітряних потоків через огорожувальні конструкції забезпечує стабільний мікроклімат та енергоефективність.
- **Пароізоляційний шар** необхідний для запобігання конденсації вологи всередині матеріалів стін і утеплювача.

3. Вимоги до звукоізоляції. Огороджувальні конструкції повинні забезпечувати ефективну звукоізоляцію, особливо у міських умовах: використання матеріалів із високим коефіцієнтом звукопоглинання, уникнення прямих акустичних містків через ретельну герметизацію швів та стиків.

4. Вимоги до довговічності та екологічності матеріалів. Для забезпечення тривалого терміну експлуатації огорожувальних конструкцій та їх безпечності для здоров'я людини, необхідно враховувати: використання матеріалів із високою стійкістю до атмосферних впливів, застосування екологічно чистих і безпечних матеріалів, які не виділяють шкідливих речовин.

5. Вимоги до енергетичного балансу будівлі. Огороджувальні конструкції повинні бути частиною загальної системи енергозбереження будівлі, що включає:

- Оптимальне співвідношення між площами віконних прорізів і розмірами стін для максимального використання природного освітлення [3].
- Використання матеріалів із здатністю акумулювати теплову енергію.
- Інтеграція із системами відновлюваної енергії, наприклад, сонячними панелями чи тепловими насосами.

1.2 Аналіз наукових розробок з удосконалення організаційно-технічних рішень підвищення енергоефективності теплоізоляційної оболонки будівель

Стратегія впровадження енергозбереження в усі сфери людської діяльності передбачає розв'язання задач підвищення енергоефективності при спорудженні нових та реконструкції існуючих будівель і споруд [4,5]. Удосконалення управління та організації процесом підвищення енергоефективності будівель потребує врахування організаційно-технічних механізмів, їх комплексної реалізації [1,2,6,7]. Це буде сприяти енергоощадному використанню енергоресурсів та зниженню негативних впливів на довкілля, що дозволить розв'язати низку соціально-економічних проблем, особливо при будівництві нового та реконструкції існуючого житла на засадах біосферосумісництва.

Теоретичні напрацювання та накопичений практичний досвід щодо методичних підходів до організації та управління заходами з підвищення

енергоефективності будівель та їх окремих конструктивних елементів дають можливість виявити чинники, що впливають на вдосконалення організаційно-технічних рішень у процесі реалізації проєктів енергозбереження на різних стадіях життєвого циклу будівель [8-11]. Подальших дослідження потребують питання пошуку ефективних організаційно-технічних рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель, які формують основну частину теплоізоляційної оболонки будівлі та забезпечують оптимальні параметри мікроклімату в приміщеннях.

За умов поглинення енергетичної кризи та ускладнення екологічної ситуації особливої актуальності набуває проблема скорочення енергоспоживання відповідно до принципу досягнення максимальної енергоефективності будівель за мінімальних сумарних енерговитрат протягом усього життєвого циклу. Підвищення енергоефективності будівель неможливе без удосконалення теплоізоляційної оболонки, що складається з системи огорожувальних конструкцій і забезпечує нормативні санітарно-гігієнічні умови у приміщеннях. У зарубіжних та вітчизняних наукових працях значна увага приділяється розвитку методичного інструментарію, аналізу, оцінюванню та обґрунтуванню раціональних організаційно-технічних рішень під час улаштування теплоізоляційної оболонки будівель [6-20]. Основна ідея таких досліджень полягає у пошуку способів зниження енергетичних витрат у будівельній сфері шляхом впровадження управлінських заходів та застосування моделей багатофакторного й багатокритеріального аналізу впливу чинників на цільову функцію [10,15,20-25].

У монографії [20] висвітлено теоретичні засади забезпечення енергоефективності та теплової надійності огорожувальних конструкцій будівель на основі досліджень питань довговічності й надійності теплоізоляції. На підставі статистичного аналізу запропоновано класифікацію теплових відмов ізоляційної оболонки, що призводять до збільшення тепловтрат через зовнішні огорожувальні конструкції. Автори акцентують на необхідності вдосконалення методології обґрунтування оптимальних енергоефективних проєктних рішень із застосуванням системного аналізу та врахуванням співвідношення між початковими енергетичними

витратами на влаштування конструкцій будівель та експлуатаційними витратами протягом життєвого циклу будівель.

У праці [11] досліджено питання підвищення ефективності організації та управління реконструкцією міської забудови шляхом урахування комплексного впливу організаційно-технологічних і управлінських чинників. Проведено формалізацію та систематизацію факторів, які визначають енергоощадність, екологічність і безпечність промислових будівель під час реконструкції. Також запропоновано методику оцінювання ефективності організаційно-технологічних рішень за умов ресурсних обмежень.

У дисертаційній роботі [15] представлено науково-методичні засади оптимізації організаційно-технологічних рішень цивільного будівництва у прибережних зонах з урахуванням динамічного та статичного стану на всіх етапах життєвого циклу об'єкту. Розроблено методологію визначення оптимальних організаційно-технологічних рішень та отримано експериментально-статистичні залежності для оптимізації показників ефективності за наявності обмежень. Проаналізовані технології улаштування зовнішніх огорожувальних конструкцій із використанням інноваційних матеріалів із покращеними тепло- та гідротеплоізоляційними характеристиками.

У дисертації [16] наведено результати розроблення концептуально-методологічних та аналітичних засад організації біосферосумісного будівництва. Акцентовано увагу на необхідності врахування екологічності, енергоощадності та сучасних інформаційно-аналітичних технологій у будівельному девелопменті. Визначено основні напрями альтернативного моделювання та коригування архітектурно-конструктивних, організаційно-технологічних, вартісних та адміністративно-управлінських рішень щодо застосування способів реалізації біосферосумісного будівництва. Розроблено науково-прикладний інструментарій, що забезпечує формалізоване поєднання параметрів тривалості, ресурсоемності та функціональних характеристик будівельних проєктів із багатокритеріальним аналітичним підходом.

У роботі [21] проаналізовано вплив температури зовнішнього повітря та

швидкості вітру тепловіддачу зовнішніх огорожувальних конструкцій. На основі чисельного моделювання визначено характер обтікання конструктивних елементів будівель вітровими потоками та встановлено розміри зон гальмування. Доведено, що на коефіцієнт тепловіддачі суттєво впливають швидкість і напрямок вітру, а також температура зовнішнього повітря. Наголошено на необхідності уточнення фактичного опору теплопередачі стінових конструкцій з урахуванням зовнішніх збурювальних чинників.

Дисертаційні дослідження [22] присвячено формуванню теоретико-методологічних засад розроблення організаційно-технологічних рішень для зведення полегшених залізобетонних конструкцій. Запропоновано методику прогнозування конструктивно-технологічних параметрів та досліджено вплив компонентів на властивості самоущільнювальних бетонних сумішей. Проведено оптимізацію конструктивних і організаційно-технологічних рішень методом торкретування та експериментально підтверджено ефективність використання внутрішньої опалубки із пінополістиролу.

У дисертаційній роботі [23] обґрунтовано застосування конструкції сонячного колектора, що інтегрується в світлопрозорі зовнішні огорожувальні конструкції будівель. Обґрунтовано ефективність застосування теплового та фотоелектричного гібридного сонячного колектора у системах енергопостачання й теплоізоляційної оболонки будівель за її техніко-економічними показниками.

За результатами експериментально-теоретичних досліджень [24] розроблено методику оцінювання експлуатаційних характеристик та довговічності фасадної теплоізоляції з декоративним штукатурним опорядженням. Визначено залежність деформації штукатурного шару від температурних перепадів та вдосконалено математичну модель розрахунку температурно-вологісного режиму фасадної теплоізоляції з метою підвищення енергоефективності будівель.

У роботі [25] досліджено шляхи вдосконалення організаційно-технологічних рішень щодо улаштування фасадних систем багатоповерхових цивільних будівель. Запропоновано аналітичну модель ранжування факторів впливу на вибір раціональної фасадної системи. Встановлено, що на зменшення ефективності фасадної системи

впливає недосконала методологія оцінювання тривалості міжремонтного періоду, низька якість прогнозування зміни фізичних параметрів утеплюючих елементів. Експертна оцінка чинників впливу на вибір раціональної фасадної системи дозволила зробити висновки про їх домінантність, а саме термін служби, вартість та трудомісткість влаштування фасадної системи та тривалість міжремонтних періодів з метою реновації їх визначальних параметрів.

У статті [17] проаналізовано еволюцію вимог до енергоефективності будівель в Україні та їх вплив на розвиток теплоізоляційних рішень для огорожувальних конструкцій. Розглянуто підходи до проектування теплоізоляційної оболонки житлових будинків із метою досягнення нульового або позитивного енергетичного балансу.

У роботі [18] досліджено питання раціонального вибору товщини теплоізоляційних матеріалів та їх розміщення у конструкції стіни. Запропоновано алгоритм визначення оптимального розташування утеплювача залежності від величини тепловтрат через зовнішні огорожувальні конструкції. Відзначено перспективність розвитку математичних моделей тепловтрат з урахуванням впливу «містків холоду».

У дослідженні [26] визначено основні фактори впливу на термін виконання робіт з утеплення фасадів багатоповерхових будівель: організаційно-технологічні, природно-кліматичні, об'ємно-планувальні та конструктивні. Розглянуто методологію використання експертних оцінок при утепленні зовнішніх стін багатоповерхових будівель. Встановлено, що найбільший вплив на термін утеплення фасадів становлять складність форм фасаду, методи організації робіт та конструктивні особливості. Підкреслена тенденція підвищення вимогливості інвесторів стосовно економічності та комфортності будівель.

Запропоновано у праці [27] багатошарову стінову панель типу «сендвіч», яка складається із зовнішніх армованих шарів та внутрішнього теплоізоляційного шару. Використання незнімної опалубки із пінополістиролу сприяє підвищенню технологічності та швидкості зведення багатошарових огорожувальних конструкцій на основі монолітного залізобетону та ефективного теплоізоляційного матеріалу.

У роботі [28] підкреслено, що при обґрунтуванні прийняття рішення щодо подальшої експлуатації системи теплоізоляції, окрім традиційних методів оцінювання її технічного стану та формування рекомендацій з подальшого використання, доцільно оцінювати економічну ефективність вибору способу ремонту або відновлення.

У монографії [29] досліджено сучасний стан та перспективи підвищення енергоефективності малоповерхових будівель шляхом застосування термічно неоднорідних непрозорих огорожувальних конструкцій.

Проведений аналіз літературних джерел свідчить про недостатню кількість комплексних досліджень, присвячених оптимізації організаційно-технологічних рішень улаштування та термомодернізації теплоізоляційної оболонки будівель. Одним із ключових завдань сьогодення є зниження енергоспоживання за умови забезпечення комфортного мікроклімату у приміщеннях. Це обумовлює необхідність подальшого вивчення впливу організаційно-технічних чинників на енергоефективність огорожувальних конструкцій та застосування сучасних методів моделювання й багатокритеріального аналізу для управління параметрами енергоощадності протягом життєвого циклу будівель, та виконання ієрархічної класифікації кількісних та якісних чинників впливу на цільову функцію.

Аналіз методологічних підходів до оцінювання організаційно-технічних чинників впливу на енергоефективність огорожувальних конструкцій підтверджує необхідність подальшого вдосконалення методичних принципів їх оптимізації із застосуванням сучасних інструментів багатокритеріального аналізу та врахуванням тенденцій розвитку будівельної науки і практики. Для розвитку інструментарію визначення критеріїв оцінювання організаційно-технічних рішень щодо підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій запропоновано алгоритм дослідження факторів впливу на прийняття управлінських рішень при виборі оптимального способу їх реалізації (рис. 1.1) [30].

Відповідно до зазначеного алгоритму визначальним етапом є обґрунтування критеріїв оцінювання, оскільки будівельний комплекс виконує системоутворювальні та інтегральні функції в економіці. Під час вибору критерію енергоефективності

домінуючим є принцип забезпечення максимальної енергетичної ефективності будівлі за мінімальних сукупних витрат енергії протягом усього життєвого циклу. Аналітична модель оцінювання системного впливу чинників на енергоефективність огорожувальних конструкцій має ґрунтуватися на сучасних методах багатокритеріального аналізу факторів, що визначають значення цільової функції.

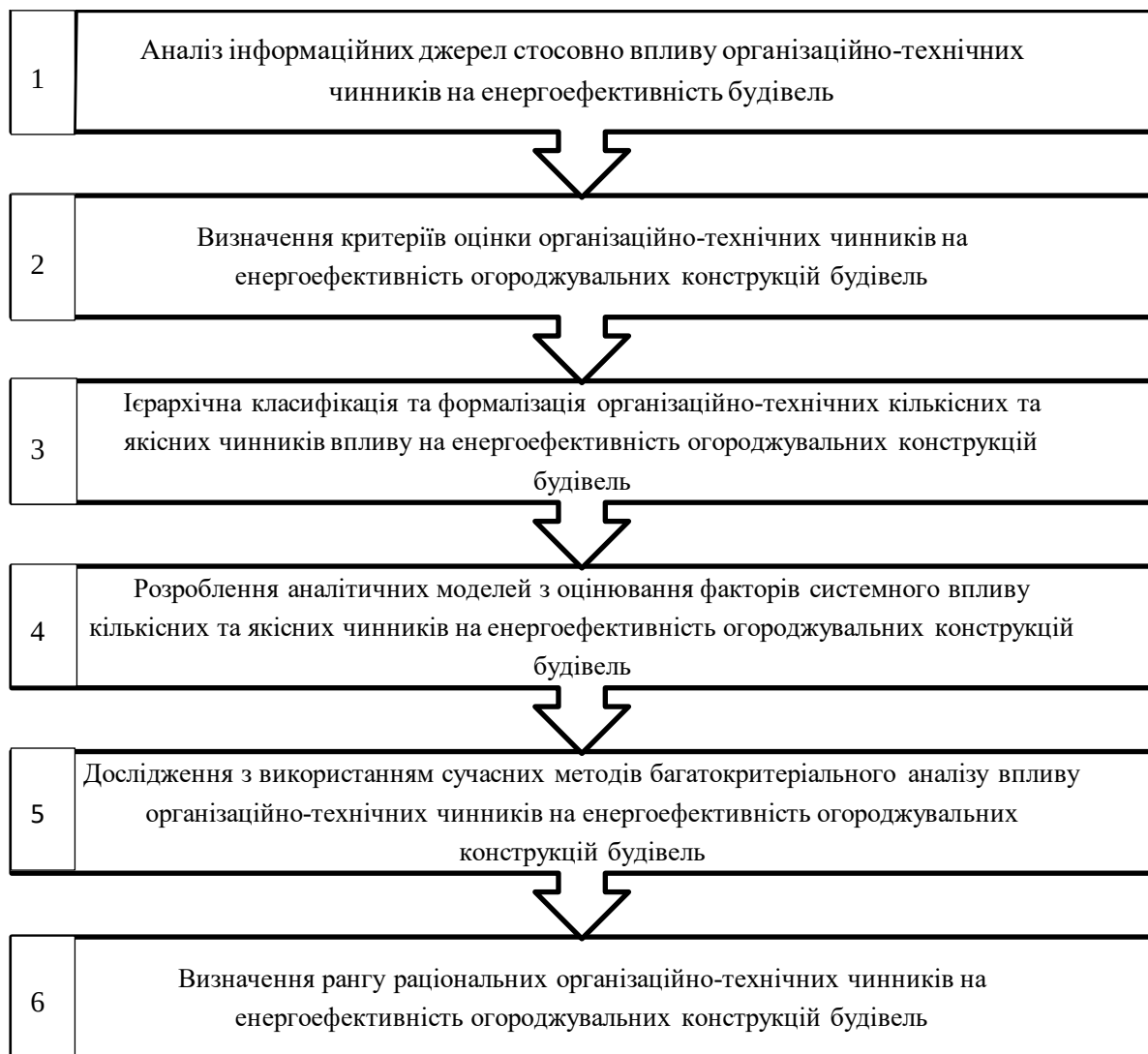


Рисунок 1.1 - Алгоритм досліджень впливу організаційно-технічних чинників на енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель

Методичні підходи до організаційно-технічного забезпечення влаштування енергоефективних огорожувальних конструкцій із врахуванням умов їх подальшої експлуатації мають базуватися на врахуванні комплексу системоутворювальних чинників. Формування енергоекономічної моделі використання енергетичних і

природних ресурсів у процесах будівництва та експлуатації огорожувальних конструкцій передбачає врахування ряду ключових факторів:

- природно-кліматичні, які визначають особливості забудови територій, а також впливають на обсяги енергетичних ресурсів, необхідних для підтримання нормативних санітарно-гігієнічних параметрів внутрішнього середовища будівель;

- мікроклімат приміщень, що формується завдяки забезпеченню оптимальних теплових, повітряних і світлових характеристик та значною мірою залежить від параметрів огорожувальних конструкцій, співвідношення площ прозорих і непрозорих елементів оболонки будівлі та їх теплозахисних властивостей;

- надійність теплоізоляційної оболонки будівель, за якої огорожувальні конструкції повинні забезпечувати необхідний рівень теплозахисту та енергоефективності при мінімізації сумарних енергетичних витрат упродовж життєвого циклу об'єкта;

- енергоємність будівлі, який охоплює витрати енергії на виробництво будівельних матеріалів, конструктивних елементів та інженерних систем, що забезпечують належні умови експлуатації, зокрема систем вентиляції, кондиціонування, теплопостачання і гарячого водопостачання;

- архітектурно-планувальні рішення будівель суттєво впливають на рівень енергоефективності і повинні враховувати функціональне призначення об'єктів - житлових, громадських, промислових, сільськогосподарських чи медичних - та забезпечувати мінімізацію тепловтрат через огорожувальні конструкції при створенні комфортного мікроклімату;

- довговічність, яка визначає здатність будівлі зберігати необхідні фізико-технічні характеристики, зокрема міцність і теплозахисні властивості, протягом усього терміну експлуатації за умов впливу зовнішніх кліматичних чинників та можливих внутрішніх негативних впливів;

- екологічність що передбачає скорочення негативного впливу на довкілля шляхом раціонального використання енергетичних ресурсів, зниження викидів парникових газів та впровадження альтернативних джерел енергії.

Проведений аналіз системоутворювальних факторів, що визначають витрати

енергії та ресурсів під час формування теплоізоляційної оболонки будівлі, створює підґрунтя для їх подальшої ієрархічної систематизації та формалізації з метою багатокритеріального оцінювання впливу на енергоефективність огорожувальних конструкцій.

1.3 Практичний досвід організаційно-технічних рішень підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель

Важливим завданням сучасного будівництва є підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій, яке спрямоване на зниження енергоспоживання та поліпшення екологічної безпеки. У світовій і національній практиці напрацьований значний досвід впровадження організаційно-технічних рішень, які забезпечують підвищення енергоефективності будівель.

1. Організаційні рішення з підвищення енергоефективності є важливою складовою процесу енергоефективної модернізації будівель і включають[18,20,22,30]:

- **Впровадження енергоаудиту**, який дозволить визначити основні джерела тепловтрат та розробити заходи для їх усунення.
- **Стратегічне планування реконструкційних заходів** для визначення пріоритетів і черговості впровадження енергоефективних технологій.
- **Сертифікація будівель за стандартами енергоефективності**, що дозволяє контролювати відповідність будівель сучасним нормам енергозбереження.

2. Технічні рішення для підвищення енергоефективності.

Практичний досвід свідчить, що ефективними технологічними заходами є:

- **Модернізація зовнішніх стін** шляхом утеплення мінераловатними або пінополістирольними плитами з подальшим нанесенням декоративного шару.
- **Установлення енергоефективних вікон і дверей** із багатокамерними склопакетами та терморозривами.
- **Використання «розумних» фасадних систем**, які реагують на зміни зовнішніх кліматичних умов і регулюють теплообмін.

- **Інтеграція вентиляційних систем з рекуперацією тепла**, які забезпечують свіже повітря з мінімальними тепловтратами [31].

У країнах Європейського Союзу та Північної Америки активно застосовуються такі рішення:

- **Пасивні будинки** - будівлі з мінімальним енергоспоживанням завдяки високому рівню теплоізоляції та герметичності.
- **Використання відновлюваних джерел енергії** (сонячні батареї, теплові насоси) як складової енергоефективних огорожувальних конструкцій[31].
- **Зелені дахи та фасади**, які не лише зменшують теплові втрати, а й покращують мікроклімат навколишнього середовища[32].

Аналіз порівняння тепловізійних характеристик зовнішніх стінових огорожувальних конструкцій, що отримані в результаті тепловізійних обстежень багатоповерхових житлових будинків по вул. Пирогова, вул. Академіка Ющенка, вул. Політехнічна м. Вінниці (рис. 1.2) свідчить, фактичні значення термічного опору зовнішніх стін можуть відхилятися від нормативних до 20 %[33]. Найбільші тепловтрати спостерігаються у вузлах примикання на горищах, у підвальних частинах, біля входних зон та віконних прорізів. Це свідчить про необхідність впровадження сучасних енергозберігаючих заходів для підвищення теплової надійності будівель, зведених упродовж останніх десятиліть.

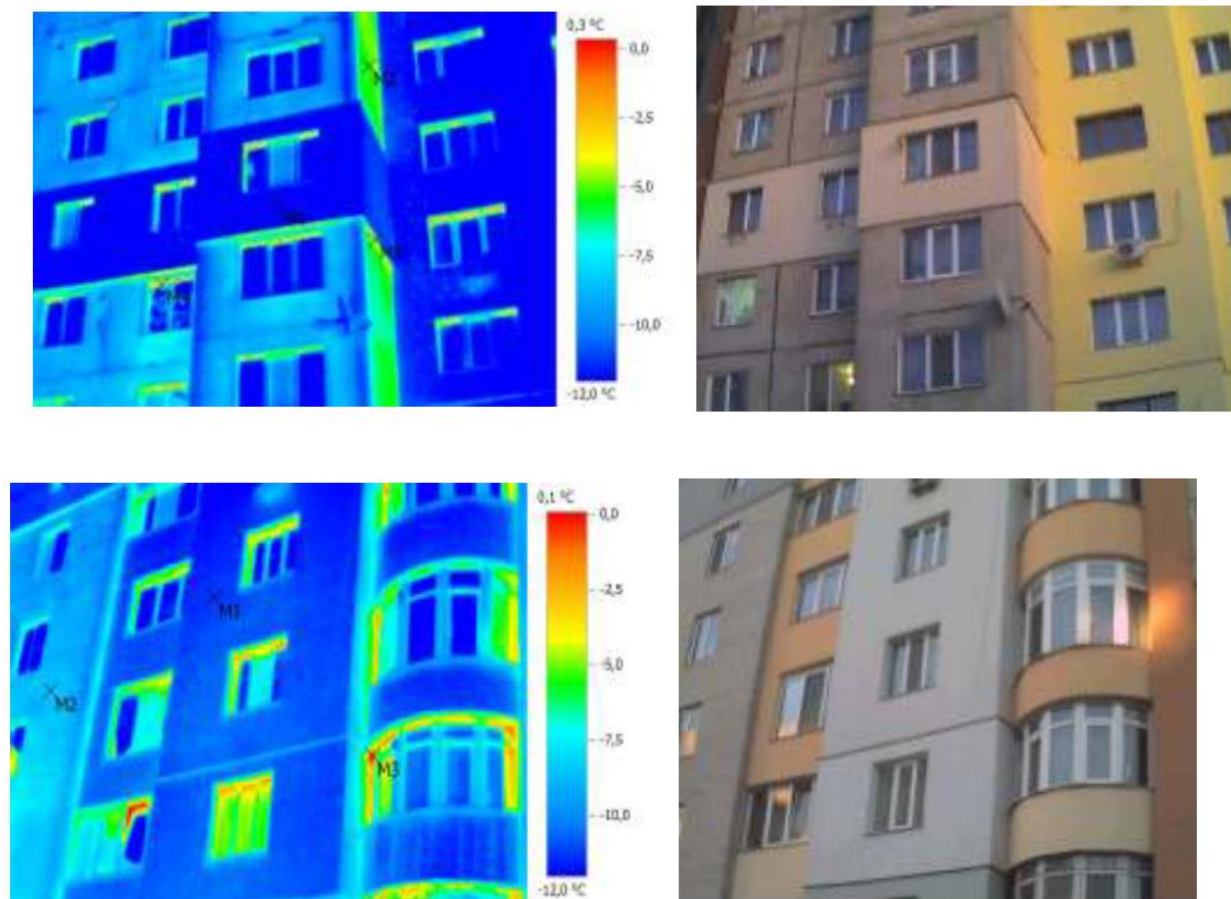


Рисунок 1.2 – Термограма зовнішніх огорожувальних конструкцій житлового будинку по вул. Пирогова, 89А, кількість поверхів – 10, введено в експлуатацію в 1994 році, по вул. Академіка Ющенка, 16, кількість поверхів – 9, введено в експлуатацію в 2005 році [33]

Якісне утеплення покрівлі сприяє зменшенню тепловтрат у холодний період року та запобігає перегріванню приміщень у літній період. Під час вибору теплоізоляційних матеріалів необхідно враховувати не лише їх теплотехнічні характеристики, а й вологостійкість, екологічну безпечність – викиди парникових газів [34], пожежну безпеку і довговічність. Комплексна термомодернізація дозволяє суттєво підвищити рівень енергоефективності з 37% до майже 60%, а також скоротити викиди вуглекислого газу майже на 50% [35].

В роботі М. Nuruddin et al. [36] розглядається застосування нових теплоізоляційних матеріалів і конструктивних рішень – Карок волокна з низькою теплопровідністю. Автори роботи У. Zhang [37] вивчали властивості

теплоізоляційних характеристик покрівлі будівлі в поєднанні з фототермічною технологією. V. Joshi et al. [38] зробив аналіз різних типів даху (залізобетонний дах; дах із оцинкованого заліза; газон на залізобетонному даху; шар вологої піщаної подушки на залізобетонному даху; дах із глиняної черепиці та солом'яний дах), оцінив роль покрівельного елемента у зменшенні сонячного нагріву. Результати показали, що газон на залізобетонному даху може бути найкращим вибором серед розглянутих варіантів. Дах із глиняної черепиці, солом'яний дах - кращі за залізобетонний дах за показником зменшення теплового навантаження. У дослідженнях [39,40] виконано порівняння теплових характеристик різних досліджувальних покрівельних матеріалів. A. Jayalath et al. [40] виявив вплив шарів даху зі зміною фази на теплові характеристики житлового будинку. Було виготовлено Shilei Lu et al. [41] своєрідну евтектичну суміш (Фазово-змінні матеріали, PCM), яка була інкапсульована в поліетиленову трубу підвищеної термостійкості для використання в будівництві дахів. Фазово-змінні матеріали (PCM) і холодні матеріали, що використовуються в будівництві, можуть не тільки ефективно зменшити споживання енергії будівлями, але й покращити тепловий комфорт у приміщенні.

В Україні затверджено стратегічні документи з реалізації у 2024 – 2026 роках Довгострокової стратегії термомодернізації будівель на період до 2050 року кабінетом Міністрів України від 29 грудня 2023 р № 1228 – р. Більше 80% будівель побудовано до 1991 р. в Україні, енергоспоживання такими будівлями – $163 \text{ кВт} \times \text{год} / \text{м}^2$, що перевищує на 30 – 50 % показник європейських країн. Це пояснюється великими тепловтратами через огорожувальні конструкції з низькими теплоізоляційними властивостями і викликає потребу у вдосконаленні організаційно-технічного регламенту влаштування та експлуатації огорожувальних конструкцій [42,43].

Протягом 2000 – 2019 років в ЄС рівень енергоефективності житлових будівель збільшився на 29 %. В жовтні 2020 р. В ЄС відповідно до European Green Deal (Європейська зелена угода) започаткований проєкт Renovation Wave (Хвиля реновації) [44] для житлових та громадських будівель для того, щоб збільшити у двічі річні темпи термомодернізації будівель, до 2030 р. 35 млн. будівель повинні

досягнути високого рівня енергоефективності. На Україні вартість комплексної термомодернізації багатоквартирного будинку на початку 2022 р. – близько 8 млн. грн., а на кінець року у зв'язку з інфляцією, спричиненою війною, - понад 12 млн. грн.

Відповідно до стратегічних пріоритетів інноваційної діяльності, визначених Законом України «Про інноваційну діяльність», впровадження енергозберігаючих покриттів будівель є важливим аспектом підвищення енергоефективності. Невирішеною залишається проблема вдосконалення організаційно-технічного регламенту влаштування та експлуатації огорожувальних конструкцій будівель. Відсутній цілісний комплекс моделей, методів і інструментів для впровадження ефективних організаційно-технологічних рішень щодо вибору енергозберігаючих покриттів будівель (ДБН В.2.6 – 31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель). Також недостатньо досліджені питання обґрунтування організаційно-технологічних підходів до вибору енергозберігаючих покриттів для існуючих будівель (ДСТУ В.2.6-220:2017 Покриття будівель і споруд). У контексті глобальних екологічних викликів і зростання вартості енергоносіїв, енергозберігаючі технології в будівництві набувають особливої значущості.

У рамках дослідження проаналізували наступні **нормативно-правові документи:**

- Державні будівельні норми[2,45];
- Державні стандарти України [8,46-55];
- Програми державного фінансування термомодернізації (ЄС та місцеві ініціативи):
 - проєкт Renovation Wave в ЄС [44];
 - Довгострокова стратегія термомодернізації будівель на період до 2050 року [56];
- постанова від 25.11.2022 № 1315 Про затвердження Порядку обміну інформацією між Державним агентством з енергоефективності та енергозбереження та кваліфікаційними організаціями[56];
- Закони та стандарти у сфері енергоефективності будівель.

Проведені дослідження у 2020–2025 роках визначили, що в результаті термомодернізації покриттів в Україні зменшилися середні тепловтрати на 27% [58]. У табл. 1.1 наведено основні показники зниження тепловтрат та викиди діоксиду вуглецю (CO₂).

Таблиця 1.1- Статистичні дані результатів термомодернізації покриттів в Україні [58].

Рік	Кількість проєктів	Зниження тепловтрат, %	Викиди CO ₂ , т/рік
2022	150	18	1200
2023	220	22	980
2024	280	25	870
2025	290	27	800

Проведений аналіз проєктів термомодернізації у 2022–2025 роках довів (табл. 1.2), що при застосуванні сучасних технологій можна знизити ці втрати на 40–50%.

Таблиця 1.2 - Результати економії тепла в результаті впровадження сучасних технологій термомодернізації будівель [58].

Тип будівлі	Початкові втрати тепла, кВт× год /м ²	Знижені втрати тепла, кВт× год /м ²	Економія, %
Житловий будинок	180	90	50
Офісний центр	150	85	43
Промислові будівлі	220	130	41

Аналізу експлуатації та влаштування покриттів [58] дозволив виділити **основні проблеми та недоліки в реалізації термомодернізаційних заходів**, які згрупували в основні групи:

1. Технічні проблеми

- Низька якість матеріалів може проявитися у використанні неякісних або застарілих ізоляційних матеріалів, що не забезпечують достатнього рівня теплоізоляції.

- Неправильний вибір технологій, невідповідність обраних методів термомодернізації, специфікації об'єкта (наприклад, неврахування паропроникності покриттів).

- Проблеми з герметичністю виникають при неякісному виконанні робіт, що призводить до утворення містків холоду[60], конденсації вологи та передчасного руйнування конструкцій.

- Відсутність комплексного підходу виконання термомодернізаційних заходів без урахування загального стану огорожувальних конструкцій, що може знижувати ефективність заходів.

2. Економічні та фінансові обмеження

- Висока вартість матеріалів та робіт призводить до значних інвестицій на термомодернізацію, що ускладнює її реалізацію для багатьох власників будівель.

- Тривалий термін окупності заходів може проявитися лише через 10-20 років, що знижує зацікавленість у їх впровадженні.

- Відсутність або недостатність фінансування програм підтримки, державних і муніципальних субсидій на реалізацію термомодернізаційних заходів.

3. Організаційно-управлінські недоліки

- Низький рівень професійної підготовки, дефіцит кваліфікованих спеціалістів призводить до неякісного виконання робіт.

- Відсутність контролю та моніторингу чи слабкий контроль за дотриманням будівельних норм і стандартів під час реалізації проєктів.

- Бюрократичні складнощі – складна процедура отримання дозволів, що затримує реалізацію проєктів термомодернізації.

4. Екологічні та експлуатаційні фактори

- Вплив кліматичних умов проявляється у різких перепадах температур, підвищенні вологості або ультрафіолетове випромінюванні і це може негативно позначатися на ефективності термомодернізації.

- Проблеми з утилізацією старих матеріалів виникає при демонтажі та заміні конструкцій, що часто призводить до утворення великої кількості будівельних відходів, що потребує спеціальної утилізації [61].

- Проблема зменшення негативного впливу теплопровідних включень на стан теплоізоляційної оболонки при експлуатації будівель [60].

- Збільшене навантаження на конструкцію відбувається при використанні додаткових шарів утеплення, що збільшує вагове навантаження на будівлю, і це не завжди враховується при розрахунках.

5. Соціально-психологічні фактори

- Низька обізнаність власників будівель призводить до недостатнього розуміння переваг термомодернізації та можливостей фінансування таких заходів.

- Скептичне ставлення до нових технологій викликає відсутність довіри до інноваційних рішень через брак досвіду їх використання.

1.4 Аналіз фізичних та математичних моделей організаційно-технічного забезпечення рішень з удосконалення теплоізоляційних властивостей огорожувальних конструкцій будівель

Інструментарій підтримки прийняття управлінських рішень щодо організаційно-технічного забезпечення удосконалення теплоізоляційної оболонки будівель охоплює сукупність взаємопов'язаних процедур та методів, спрямованих на комплексне оцінювання факторів впливу на енергоефективність огорожувальних конструкцій і вибір оптимальних альтернатив за визначеними критеріями. Для реалізації таких завдань застосовують методи фізичного та математичного моделювання.

Використання фізичного моделювання пов'язане зі значними фінансовими витратами та тривалістю виконання досліджень. Крім того, подібні методи мають обмеження щодо врахування великої кількості взаємопов'язаних факторів, що ускладнює отримання достатньо репрезентативних результатів. Це особливо відчутно при впровадженні інноваційних технологій, ефективність яких ще недостатньо підтверджена практичним досвідом у будівництві.

Для пошуку раціональних організаційно-технічних рішень більш доцільним є застосування математичних методів моделювання, серед яких використовують дерева рішень, теорію ігор, методи лінійного програмування, кореляційно-регресійний аналіз, інструменти нечіткої логіки, нейронні мережі та інші сучасні підходи.

Для обґрунтування доцільності впровадження інформаційних технологій для підтримки організаційно-технічних рішень щодо підвищення енергоефективності теплоізоляційної оболонки будівель наведено аналіз використання методів математичного моделювання в будівельній галузі [62-70].

У дослідженні [66**Error! Reference source not found.**] проаналізовано можливості комп'ютерного моделювання інженерних процесів на різних етапах життєвого циклу будівель і споруд. Основну увагу приділено пошуку шляхів підвищення енергоефективності об'єктів шляхом врахування реологічних процесів і можливих змін умов експлуатації. Автори акцентують увагу на необхідності застосування BIM-технологій у процесі архітектурно-будівельного проектування.

У роботі [67] розглянуто питання впровадження BIM-технологій у будівельну практику та показано їх ефективність на різних етапах проектування. На основі тепловізійних обстежень втрат тепла через віконні конструкції запропоновано підходи до формування тривимірних моделей будівель для подальшого проектування та аналізу енергетичних характеристик.

У дослідженні [68] BIM-технології розглядаються як інструмент інтеграції інформаційних потоків між етапами будівельно-інвестиційного процесу. Такий підхід є особливо актуальним за умов використання сучасних матеріалів, конструкцій і технологій при удосконаленні теплоізоляційної оболонки будівель. Інформаційне моделювання дозволяє створювати параметризовані бази даних, здійснювати прогнозування експлуатаційної надійності та підтримувати процес управління проєктами.

У роботі [69] підкреслюється, що концепція інформаційного моделювання будівель базується на використанні BIM-технологій, які забезпечують можливість

аналізу та вибору альтернативних проєктних рішень протягом усього життєвого циклу об'єкта.

Дослідження [70] присвячене експериментально-статистичному моделюванню організаційних і фінансових рішень у будівництві. Автори застосували поліноміальну модель, яка дозволяє враховувати вплив комплексу організаційних факторів на інтенсивність фінансування будівельних процесів та визначати раціональні рівні параметрів залежно від способу фінансування.

У роботах [62-65,71] обґрунтовано доцільність використання методів фізичного та математичного моделювання під час реалізації проєктів з удосконалення теплоізоляційної оболонки будівель. Для оцінювання енергоефективності огорожувальних конструкцій рекомендовано застосовувати багатокритеріальні методи аналізу факторів впливу. З метою ідентифікації складних нелінійних залежностей пропонується використовувати логіко-лінгвістичні моделі, які дають можливість одночасно враховувати кількісні та якісні показники.

Питання впливу визначальних факторів на прогнозовану надійність енергоефективності огорожувальних конструкцій висвітлено у дослідженні [72], де акцентовано увагу на необхідності вдосконалення математичного апарату для вибору оптимальних рішень під час влаштування та експлуатації теплоізоляційної оболонки будівель.

У роботі [73] наведено аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду розвитку інструментарію енергетичного моделювання. Зазначено, що моделі оцінювання енергетичної ефективності повинні мати достатню гнучкість структури та забезпечувати можливість оперативного врахування змін вхідних параметрів і критеріїв оцінювання.

У дослідженні [74] зазначено, що в Україні недостатньо поширеним є застосування динамічного енергетичного моделювання на основі системного аналізу. Водночас використання спеціалізованих програмних комплексів дозволяє суттєво скоротити часові витрати на створення енергетичних моделей будівель.

У статті [75] рекомендовано застосовувати програмний продукт Revit на початкових стадіях проєктування для прогнозування енергетичних характеристик

будівель. Використання такого програмного забезпечення дозволяє враховувати змінні теплотехнічні параметри матеріалів та особливості технологічних процесів.

У роботі [76] наведено аналіз методів встановлення «стандарту» енергоспоживання. Підкреслено доцільність побудови багатфакторних математичних моделей енергоспоживання.

У роботі [77] розглянуто методи прогнозування в енергозбереженні та архітектурі. Підкреслено сильні та слабкі сторони таких методів як цільове прогнозування та екстраполяція. Для формування прогнозованої моделі енергоспоживання доцільно застосовувати морфологічний аналіз виявлення факторів впливу на цільову функцію на засадах формалізації об'єкта та побудови формалізованих математичних моделей та дослідження адекватності результатів моделювання.

Дослідження [25] щодо довговічності та експлуатаційних характеристик фасадної теплоізоляції підтвердили необхідність розроблення математичних моделей прогнозування стану огорожувальних конструкцій. Запропоновано алгоритми розрахунку температурно-вологісного режиму теплоізоляційних систем для підвищення їх енергоефективності.

У монографії [20] наведено методику оцінювання надійності теплоізоляційних матеріалів та результати числового моделювання із застосуванням багатокритеріального аналізу для визначення потенціалу енергоефективності огорожувальних конструкцій.

У роботі [78] використання Байєсовських мереж для управління складними та невизначеними параметрами будівельних проєктів. Такий підхід забезпечує інтеграцію експертних знань із емпіричними даними та підтримує адаптивне прийняття рішень.

У дослідженні [79] наголошено, що під час оцінювання енергетичної ефективності будівель необхідно враховувати сукупні енергетичні витрати на влаштування, експлуатацію, реконструкцію та утилізацію огорожувальних конструкцій із можливістю повторного використання матеріалів. Запропоновано

ієрархічну систему параметрів впливу, що характеризуються як кількісними, так і якісними показниками, які можуть бути представлені лінгвістичними змінними.

Модель енергозбереження, побудована на основі TRIZ - теорії розв'язання винахідницьких задач, передбачає[81]:

1. Виявлення проблеми - наприклад, надмірні втрати тепла через огорожувальні конструкції будівлі.
2. Формулювання технічного протиріччя - при посиленні теплоізоляції зростає вартість і вага конструкцій; при зменшенні вартості - падає ефективність.
3. Застосування принципів TRIZ - вибір типових прийомів (наприклад, “перехід у надсистему”, “додатковий вимір”, “динамічність”), з метою пошуку оптимального рішення.

В Україні вимоги до теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій регламентуються чинними нормативними документами [1,2]. Проте існуюча нормативна база не забезпечує повною мірою прогнозування ймовірності теплових відмов під впливом комплексу негативних факторів. Це обумовлює необхідність розроблення проєктних рішень, спрямованих на мінімізацію впливу кількісних та якісних чинників на надійність теплоізоляційної оболонки будівлі.

Особливо актуальними такі підходи є для управління проєктами термомодернізації будівель на стадії формування інвестиційної концепції, оскільки зростання ймовірності теплових відмов призводить до погіршення мікрокліматичних умов у приміщеннях, зниження температур внутрішніх поверхонь конструкцій та збільшення витрат енергоносіїв [7,82,83]. Особливо це стосується управління енергозберігаючими проєктами термомодернізації будівель [7] на етапі розробки концепції інвестиційної фази проєкту, так як збільшення ймовірності теплової відмови теплоізоляційної оболонки призводить до зменшення комфортних мікрокліматичних умов в приміщеннях та зниження локальних температур внутрішньої поверхні огорожувальних конструкцій [7, 82].

Теплоізоляційна оболонка будівлі повинна забезпечувати комфортні санітарно-гігієнічні умови, відповідати технологічним вимогам і враховувати естетичні, соціальні та економічні аспекти експлуатації. За визначенням Г. Г. Фаренюка [82],

теплова відмова теплоізоляційної оболонки – це стан, за якого подальша експлуатація будівлі призводить до порушення умов життєдіяльності, зниження довговічності конструкцій та збільшення енергетичних витрат.

Питання теплової надійності теплоізоляційних оболонок будівель досліджувалися у роботах вітчизняних [82-87] та зарубіжних вчених [34-41, 88-90].

На основі статистичних даних у праці [82] запропоновано класифікацію теплових відмов огорожувальних конструкцій та визначено закономірності їх виникнення для будівель, споруджених відповідно до різних нормативних вимог. (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 - Розподіл виникнення теплових відмов у будинках різних років забудови [82]

Період забудови	Причини теплових відмов, %			
	Проектні	Технологічні	Експлуатаційні	Концептуальні
1960-1995	10	35	35	20
1996-2006	35	20	5	40

В дослідженні [85] підхід до числового оцінювання теплової надійності однорідних огорожувальних конструкцій за показником тепловтрат. Основними критеріями оцінювання визначено відхилення фактичного опору теплопередачі від проєктних значень, що виникають унаслідок варіативності геометричних параметрів і теплофізичних характеристик матеріалів, а також перевищення допустимих значень щільності теплового потоку через конструкцію.

У роботах зарубіжних науковців [88-90] встановлено, що на теплову надійність огорожувальних конструкцій значною мірою впливають зміни теплотехнічних властивостей матеріалів, які використовуються при їх виготовленні. Такі зміни пов'язані насамперед із технологічними чинниками та особливостями виробництва будівельних виробів.

В роботі [87] за результатами аналітичних досліджень температурного режиму внутрішнього повітря в холодний період року визначено, що істотний вплив на сумарні тепловтрати мають дефекти, які виникають під час виготовлення або експлуатації огорожувальних конструкцій. Запропоновано аналітичні залежності для прогнозування теплової надійності конструкцій із дефектами та визначення температурного режиму у приміщеннях будівлі.

У дослідженнях [84, 88, 91] також розглядається вплив дефектів огорожувальних конструкцій на теплову надійність будівель та зміну параметрів мікроклімату в приміщеннях. Автори наголошують на необхідності проведення термореновації зовнішніх огорожувальних конструкцій шляхом їх додаткового утеплення.

У роботі [83] представлено методику оцінювання теплової відмови огорожувальних конструкцій, виконаних із сталевих холодноформованих елементів, за критерієм локального зниження температури. Теплову відмову трактують як ситуацію, коли температура на внутрішній поверхні конструкції стає нижчою за температуру конденсації водяної пари. На основі числового моделювання рекомендовано визначати математичне сподівання та стандартне відхилення локальної температури внутрішньої поверхні стіни.

У роботі [86] розроблено методичний підхід до визначення ймовірності теплової відмови огорожувальних конструкцій зі сталевих холодноформованих елементів за теплотехнічними характеристиками. Запропонований математичний апарат дозволяє оцінити вплив мінливості теплофізичних параметрів на безвідмовність функціонування теплоізоляційної оболонки будівлі. Методика також враховує особливості проєктних рішень та технологію влаштування конструкцій.

Аналіз факторів, що визначають надійність та енергоефективність багатошарових теплоізоляційних виробів із використанням соломи, наведено у роботі [92]. Автором запропоновано класифікацію таких виробів за теплофізичними, механічними та екологічними характеристиками. Це дозволяє встановити ієрархічні взаємозв'язки між окремими параметрами під час оцінювання теплової надійності огорожувальних конструкцій.

Проведений аналіз наукових досліджень показав відсутність комплексних і повністю сформованих методів моделювання організаційно-технічних рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності теплоізоляційної оболонки будівель. Водночас результати виконаного аналізу дали можливість окреслити основні напрями використання сучасних методів моделювання для пошуку раціональних рішень щодо удосконалення огорожувальних конструкцій та підвищення їх енергоефективності.

Висновки до розділу 1

Окреслено основні вимоги до теплоізоляційної оболонки будівель, які визначили вибір об'єкта дослідження - процеси управління підвищенням енергоефективності огорожувальних конструкцій протягом життєвого циклу будівель. Виконання вимог до енергоефективних огорожувальних конструкцій дозволяє не тільки зменшити енергоспоживання будівлі, але й створити комфортні умови для її мешканців.

Проаналізовано основні напрями наукових розробок з удосконалення організаційно-технічних рішень підвищення енергоефективності теплоізоляційної оболонки будівель. Визначено актуальність розвитку шляхів вирішення проблеми енергоощадності, що передбачає впровадження інноваційних технологій. Для вирішення поставлених задач передбачено дотримуватися розробленого алгоритму досліджень впливу організаційно-технічних чинників на енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель.

Аналіз існуючого інструментарію математичного та фізичного моделювання визначення сумарних витрат на реалізацію інновацій в організаційно-технічному забезпеченні реалізації проєктів енергоефективних огорожувальних конструкцій будівель виявив доцільність обґрунтування критеріїв оцінки чинників впливу. За результатами моделювання можна виявити їх оптимальні значення з врахуванням кількісних та якісних параметрів, що дозволяють досягти найбільшої енергетичної ефективності при мінімальних сумарних витратах енергії за весь життєвий цикл будівлі.

Розглянуто практичний досвід впровадження організаційно-технічних рішень для підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій, що демонструє значний потенціал зниження енергоспоживання. Відзначено, що використання сучасних технологій, системний підхід до планування робіт і дотримання міжнародних стандартів сприяють створенню енергоощадних будівель.

Проаналізовані результати експериментальних тепловізійних обстежень існуючих будівель в м. Вінниці свідчать про наявність відхилень теплофізичних властивостей їх огорожувальних конструкцій від діючої нормативної бази.

За результатами аналізу українських та зарубіжних досліджень виявлено причинно-наслідкові фактори, що впливають на причини теплової відмови огорожувальних конструкцій теплоізоляційної оболонки будівлі. Експериментально визначено причини теплової відмови теплоізоляційної оболонки.

При обґрунтуванні оптимального управлінського рішення доцільно використовувати методи багатофакторного та багатокритеріального аналізу з метою врахування впливу кількісних та якісних факторів на енергоефективність будівель. Дослідження ключових системоутворювальних чинників енергетичних і природних витрат, пов'язаних із формуванням теплоізоляційної оболонки будівлі, створює підґрунтя для їх подальшої системної деталізації, ієрархічного структурування та формалізації з метою багатокритеріальної оцінки впливу на енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель.

Визначені задачі досліджень, що спрямовані на вдосконалення управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель:

- провести аналітичний аналіз, узагальнення та оцінювання сучасного стану процесів управління влаштуванням і термомодернізацією огорожувальних конструкцій будівель, визначити напрями їхнього удосконалення та розвитку;
- за результатами моніторингу концепцій експериментально-аналітичних моделей підвищення надійності теплоізоляційної оболонки будівель визначити фактори впливу на енергетичну ефективність огорожувальних конструкцій будівель та здійснити їхню формалізацію та ієрархічну класифікацію;

- розробити ієрархічну систему математичних моделей управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій з урахуванням організаційно-технічних впливів;
- розробити експертно-моделюючу систему інтелектуальної підтримки управління підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій;
- експериментально дослідити теплофізичні параметри теплоізоляційних матеріалів та ефективність технічних рішень огорожувальних конструкцій як інформаційну основу для прийняття управлінських рішень;
- розробити інноваційні технічні рішення вдосконалення огорожувальних конструкцій будівель та обґрунтувати доцільність використання запропонованого інструментарію управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель.

Висунута наукова гіпотеза, яка полягує в припущенні, що підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій може бути забезпечено вдосконаленням процесів управління організаційно-технічних рішень з урахуванням виявлених факторів впливу на параметри теплоізоляційної оболонки будівель.

Наведені в розділі результати були висвітлені в таких роботах: [30], [58], [59],[60], [61], [62], [63], [64], [65], [71], [79], [81].

РОЗДІЛ 2

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ

2.1 Моніторинг визначення концепцій підвищення енергетичної надійності теплоізоляційної оболонки будівель

Проведений аналіз нормативних документів і наукових джерел показує, що на сьогодні відсутній цілісний науково-методичний підхід до оцінювання надійності теплоізоляційної оболонки будівель. Для розв'язання зазначеної проблеми, особливо за умов недостатності достовірних даних щодо теплових відмов, доцільним є формування структурної схеми моніторингу та експертно-аналітичного оцінювання надійності теплоізоляційної оболонки будівлі [93].

Ключовий вплив на рівень надійності теплоізоляційної оболонки мають параметри огороджувальних конструкцій, дотримання технологічних вимог під час їх влаштування та експлуатації, а також характеристики будівельних матеріалів і виробів. Надійність теплоізоляційних конструкцій визначається ймовірністю забезпечення їх безвідмовного функціонування зі збереженням нормативних параметрів мікроклімату в приміщеннях за встановлених умов експлуатації [82,93,94]:

$$R(t) = 1 - F(t) = P(t \leq T), \quad (2.1)$$

де $R(t)$ – імовірність безвідмовного стану комплексних параметрів теплоізоляційних будівельних конструкцій;

t – час імовірності втрати нормативних параметрів будівельних конструкцій;

$F(t)$ – імовірність втрати нормативних параметрів будівельних конструкцій;

F – імовірність відмови нормативного стану комплексних параметрів теплоізоляційних будівельних конструкцій;

T – значення критерію, що характеризує безвідмовний стан.

Значна номенклатура сучасних теплоізоляційних матеріалів і виробів, а також недостатній обсяг достовірної інформації щодо тривалості їх експлуатації та параметрів теплових відмов ускладнюють можливість оцінювання імовірності безвідмовного функціонування комплексних показників за формулою (2.1).

До основних елементів механізму реалізації концепції моніторингу надійності теплоізоляційної оболонки будівлі (рис. 2.1) належать нормативно-правове забезпечення, адміністративно-управлінські механізми, екологічні інструменти впливу та система інформаційного забезпечення й управління даними.



Рисунок 2.1 – Структурна схема концепції проведення моніторингу та експертно-аналітичної оцінки надійності теплоізоляційної оболонки будівель

Правове забезпечення у сфері енергозбереження передбачає імплементацію міжнародних угод щодо енергоефективності та захисту довкілля у національне законодавство. Система адміністративного управління охоплює проведення державної експертизи енергозберігаючих рішень відповідно до принципів державної політики у сфері енергоефективності з урахуванням екологічних аспектів.

Структурна схема концепції моніторингу надійності теплоізоляційної оболонки будівлі (рис. 2.1) включає комплекс заходів енергоаудиту, до яких належать технічна діагностика тепловтрат через зовнішні огорожувальні конструкції на основі тепловізійних обстежень, експертно-аналітичне оцінювання із застосуванням математичного моделювання та аналіз ризиків виникнення теплових відмов. Отримані результати формують інформаційну основу для оптимізації управлінських рішень і визначення технічних заходів, спрямованих на підвищення надійності теплоізоляційної оболонки будівель.

Реалізація методології моніторингу та оцінювання надійності теплоізоляційної оболонки при прийнятті організаційно-технічних рішень щодо підвищення енергоефективності будівель повинна базуватись на низці важливих положень. Насамперед необхідним є врахування міжнародних стандартів та показників енергоефективності під час проведення експертно-аналітичної оцінки. Важливим також є узгодження регіональних особливостей із можливостями використання сучасних енергоефективних технологій влаштування теплоізоляційної оболонки [95,96]. Окрему увагу слід приділяти впровадженню інноваційних енергозберігаючих технологій та заходів, які сприяють зменшенню ймовірності теплових відмов огорожувальних конструкцій.

2.2 Моделювання визначення мінімальних сумарних витрат енергії на влаштування теплоізоляційної оболонки будівель з використанням нечітких множин та лінгвістичних змінних

Обґрунтування ефективних управлінських рішень щодо підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій передбачає застосування методів багатofакторного аналізу, що дають змогу враховувати як кількісні, так і якісні

фактори відповідно до їх класифікаційних ознак [7, 20, 97].

Проблематиці багатопараметричного оцінювання енергоефективності огорожувальних конструкцій із врахуванням зміни параметрів у часі присвячено низку наукових праць [9, 10, 24, 98, 99].

Під час визначення енергетичної ефективності будівлі як здатності забезпечувати необхідні умови життєдіяльності та функціонування технологічних процесів при мінімальних витратах енергії рекомендується враховувати комплекс визначальних чинників. До них належать кліматичні умови місцевості, функціональне призначення будівлі, архітектурно-планувальні та конструктивні рішення, геометричні й теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій, строк їх експлуатації, параметри інженерних систем, а також нормативні мікрокліматичні та санітарно-гігієнічні вимоги [1, 2, 7, 8, 45-55, 79, 100, 101].

Ключову роль у забезпеченні енергоефективності будівель відіграє оптимізація теплоізоляційної оболонки як основного елемента огорожувальних конструкцій [20]. Питання підвищення енергоефективності будівель і вдосконалення теплоізоляційної оболонки шляхом застосування сучасних архітектурно-будівельних рішень розглядаються у працях вітчизняних та зарубіжних дослідників [9, 10, 24, 98, 99].

Енергоефективність огорожувальних конструкцій доцільно розглядати як співвідношення між енергетичними витратами на забезпечення нормативних параметрів мікроклімату в приміщеннях та сукупними витратами енергії на будівництво, експлуатацію, реконструкцію, термомодернізацію й утилізацію матеріалів упродовж життєвого циклу будівлі [1, 2, 100, 102].

Отже, визначення шляхів підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій для забезпечення комфортних умов у приміщеннях на основі результатів математичного моделювання взаємозв'язків між визначальними чинниками є актуальним науково-практичним завданням. Базою для побудови математичних моделей може слугувати формалізація та ієрархічна класифікація кількісних і якісних параметрів впливу на цільову функцію.

Підвищення вимог до енергоефективності огорожувальних конструкцій потребує вдосконалення методів фізичного та математичного моделювання їх теплозахисних характеристик і енергетичних витрат упродовж життєвого циклу. Формування моделей мінімізації сумарних витрат на влаштування, експлуатацію, реконструкцію та утилізацію конструкцій із можливістю повторного використання матеріалів передбачає визначення оптимальних параметрів балансових залежностей [79]:

$$\sum E = E_B + E_E + E_R \rightarrow \min, \quad (2.2)$$

де $\sum E$ – сумарні витрати енергії за весь життєвий цикл огорожувальних конструкцій будівель;

E_B, E_E, E_R – відповідно витрати енергії на будівництво, експлуатацію та рециклінг матеріалів.

Процес прийняття управлінських рішень щодо реалізації організаційно-технічних заходів підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій включає виявлення, формалізацію та ієрархічне структурування факторів впливу. Формалізація забезпечує можливість опису системи впливових факторів за допомогою сукупності кількісних і якісних параметрів [7, 97]. Це створює основу для математичного моделювання та визначення оптимальних значень цільової функції в умовах ризику виникнення теплових відмов теплоізоляційної оболонки будівлі.

Використання ієрархічної класифікації дозволяє здійснювати поетапний поділ множини факторів впливу на підпорядковані класифікаційні групи [97, 102]. Такий підхід спрощує опрацювання значних масивів інформації та сприяє побудові логічних взаємозв'язків між параметрами, що визначають рівень енергоефективності огорожувальних конструкцій [1].

Оскільки на енергоефективність огорожувальних конструкцій упродовж життєвого циклу впливають як кількісні, так і якісні чинники [79], для моделювання процесів мінімізації сумарних енергетичних витрат доцільно застосовувати методи нечіткої логіки та апарат лінгвістичних змінних [103, 104]. Модель об'єкта при цьому формується у вигляді нечіткої бази знань, яка містить систему правил, що поєднують

лінгвістичні оцінки вхідних і вихідних параметрів, пов'язаних з енергоефективністю огорожувальних конструкцій будівель.

Сумарні витрати енергії протягом життєвого циклу, необхідні для забезпечення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель, відповідно до досліджень [30, 102], можуть бути представлені на системному рівні у вигляді лінгвістичної змінної (Y):

$$Y = f(X_1, X_2, X_3), \quad (2.3)$$

де X_1 – лінгвістична змінна (ЛЗ), що характеризує витрати енергії на капітальне будівництво або реконструкцію,

X_2 – лінгвістична змінна, що визначає витрати енергії на експлуатацію,

X_3 – лінгвістична змінна, що визначає витрати енергії на рециклінг.

Лінгвістичну змінну (X_1), що характеризує витрати енергії на капітальне будівництво, можна подати виразом:

$$X_1 = f_1(X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1i}), \quad (2.4)$$

де $(X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1i})$ – лінгвістичні змінні, як затрати енергії на проєктні роботи, матеріали, технологію влаштування тощо.

Лінгвістичну змінну (X_2), що характеризує витрати енергії на експлуатацію, можна описати співвідношенням:

$$X_2 = f_2(X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2j}), \quad (2.5)$$

де $(X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2j})$ – лінгвістичні змінні, як витрати енергії на матеріали, технологічні процеси з експлуатації тощо.

Лінгвістичну змінну (X_3), як витрати енергії на рециклінг, можна охарактеризувати виразом:

$$X_3 = f_3(X_{31}, X_{32}, \dots, X_{3k}), \quad (2.6)$$

де $(X_{31}, X_{32}, \dots, X_{3k})$ – лінгвістичні змінні, як витрати енергії на окремі

технологічні процеси рециклінгу.

На основі аналізу ієрархічної системи співвідношень (2.3-2.6) сформовано узагальнену модель взаємозв'язків між параметрами, що впливають на енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель, у вигляді дерева логічного висновку (рис. 2.2).

У запропонованій структурі кореневий вузол дерева (рис. 2.2) логічного висновку характеризує сумарні енергетичні витрати, необхідні для забезпечення енергоефективності огорожувальних конструкцій, тоді як кінцеві вершини відповідають визначальним параметрам впливу. Варіювання цих параметрів дає можливість визначати оптимальне значення цільової функції.

Параметри впливу (X_1, X_2, X_3) розглядаються як лінгвістичні змінні, що задаються відповідними універсальними множинами та описуються нечіткими термами у словесній формі. Для оцінювання лінгвістичних змінних на системному рівні, які відображаються співвідношеннями (2.3-2.6) та представлені у вигляді ієрархічної структури дерева логічного висновку (рис. 2.2)[79] доцільно використовувати такі терми: «низька» (Н), «нижче середньої» (НС), «середня» (С), «вище середньої» (ВС) та «висока» (В). Запропоновані підходи до формалізації та ієрархічного структурування параметрів впливу можуть бути використані як основа для побудови моделі мінімізації сумарних енергетичних витрат на влаштування теплоізоляційної оболонки будівель.

Запропоновані підходи до формалізації та ієрархічного структурування параметрів впливу можуть бути використані як основа для побудови моделі мінімізації сумарних енергетичних витрат на влаштування теплоізоляційної оболонки будівель.

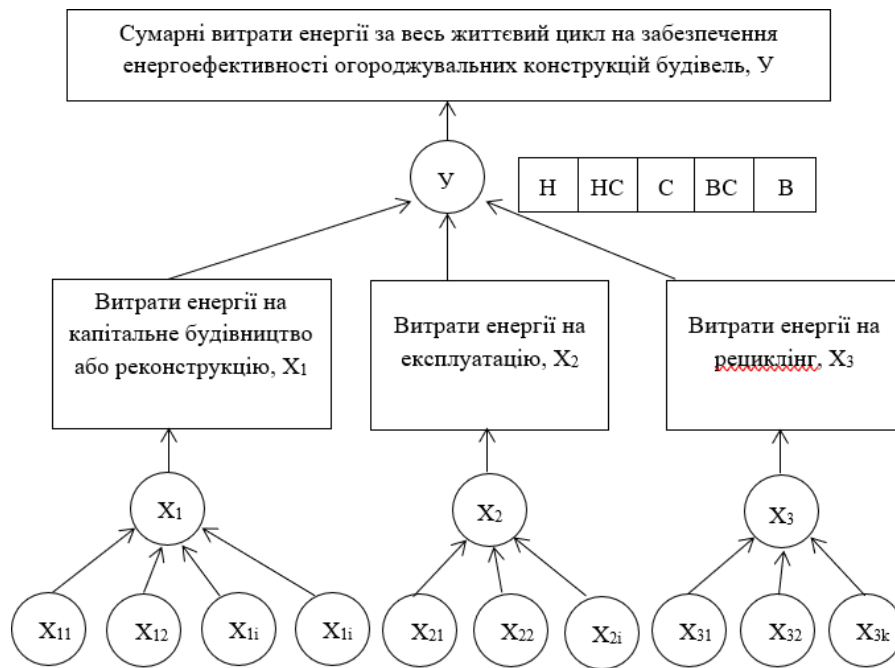


Рисунок 2.2— Дерево логічного висновку ієрархічних зв'язків для комплексного оцінювання енерговитрат життєвого циклу огорожувальних конструкцій

Відповідно до результатів досліджень [104], сумарні енергетичні витрати протягом життєвого циклу будівлі, необхідні для забезпечення енергоефективності огорожувальних конструкцій, на системному рівні можуть бути подані у вигляді лінгвістичної змінної Y відповідно до співвідношення (2.3).

Параметри, що впливають на прийняття рішень при обґрунтуванні енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель (X_1, X_2, X_3), оцінюються за допомогою нечітких термів як лінгвістичних змінних. Для формування нечіткої матриці знань, яка відображає взаємозв'язок між рівнем енергоефективності огорожувальних конструкцій та визначальними факторами впливу, використано такі лінгвістичні оцінки: «низька» (Н), «нижче середньої» (НС), «середня» (С), «вище середньої» (ВС) та «висока» (В).

Виконання нечітких логічних операцій здійснювалось із використанням узагальненого елемента нечіткого логічного висновку між лінгвістичними змінними. Апроксимацію залежності $\sum E = f(X, Y, Z)$ реалізовано за допомогою системи нечітких

правил типу «ЯКЩО-ТО» (табл.2.1) [7, 30, 79, 103,105].

Таблиця 2.1 – Нечітка матриця знань про співвідношення між енергоефективністю огорожувальних конструкцій будівель та визначальними параметрами впливу як лінгвістичними змінними на системному рівні

ЯКЩО			ТО
Вплив витрат енергії на капітальне будівництво або реконструкцію (X)	Вплив витрат енергії на експлуатацію (X ₂)	Вплив витрат енергії на рециклінг матеріалів (X ₃)	Енергоефективність огорожувальних конструкцій (ΣE)
низький (Н)	низький (Н)	низький (Н)	низький (Н)
нижче середньої (НС)	низький (Н)	низький (Н)	
низький (Н)	нижче середньої (НС)	низький (Н)	
низький (Н)	низький (Н)	нижче середньої (НС)	
низький (Н)	нижче середньої (НС)	нижче середньої (НС)	нижче середньої (НС)
нижче середньої (НС)	низький (Н)	нижче середньої (НС)	
нижче середньої (НС)	нижче середньої (НС)	низький (Н)	
нижче середньої (НС)	нижче середньої (НС)	нижче середньої (НС)	
середній (С)	середній (С)	середній (С)	середній (С)
нижче середньої (НС)	середній (С)	середній (С)	
середній (С)	нижче середньої (НС)	середній (С)	
середній (С)	середній (С)	нижче середньої (НС)	
вище середньої (ВС)	вище середньої (ВС)	середній (С)	вище середньої (ВС)
вище середньої (ВС)	середній (С)	вище середньої (ВС)	
середній (С)	вище середньої (ВС)	вище середньої (ВС)	
вище середньої (ВС)	вище середньої (ВС)	вище середньої (ВС)	
високий (В)	високий (В)	вище середньої (ВС)	високий (В)
високий (В)	вище середньої (ВС)	високий (В)	
високий (В)	вище середньої (ВС)	вище середньої (ВС)	
високий (В)	високий (В)	високий (В)	

Лінгвістичні висловлювання про співвідношення між енергетичною ефективністю огорожувальних конструкцій будівель та визначальними чинниками впливу (табл.2.1) є підґрунтям для складання системи нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних відповідним термом.

$$\begin{aligned}
 \mu_n(\Sigma E) &= \mu_n(x_1) \wedge \mu_n(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \\
 &\vee \mu_{нс}(x_1) \wedge \mu_n(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_n(x_1) \wedge \\
 &\mu_{нс}(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_n(x_1) \wedge \mu_n(x_2) \vee \mu_{нс}(x_3).
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

$$\begin{aligned}\mu_{\text{HC}}(\sum E) = & \mu_{\text{H}}(x_1) \wedge \mu_{\text{HC}}(x_2) \wedge \mu_{\text{HC}}(x_3) \vee \mu_{\text{HC}}(x_1) \wedge \\ & \wedge \mu_{\text{H}}(x_2) \wedge \mu_{\text{HC}}(x_3) \vee \mu_{\text{HC}}(x_1) \wedge \mu_{\text{HC}}(x_2) \wedge \\ & \wedge \mu_{\text{H}}(x_3) \vee \mu_{\text{HC}}(x_1) \wedge \mu_{\text{HC}}(x_2) \wedge \mu_{\text{HC}}(x_3) \vee.\end{aligned}\quad (2.8)$$

$$\begin{aligned}\mu_{\text{C}}(\sum E) = & \mu_{\text{C}}(x_1) \wedge \mu_{\text{C}}(x_2) \wedge \mu_{\text{C}}(x_3) \vee \mu_{\text{HC}}(x_1) \wedge \\ & \wedge \mu_{\text{C}}(x_2) \wedge \mu_{\text{C}}(x_3) \vee \mu_{\text{C}}(x_1) \wedge \\ & \mu_{\text{HC}}(x_2) \wedge \mu_{\text{C}}(x_3) \vee \mu_{\text{C}}(x_1) \wedge \mu_{\text{C}}(x_2) \wedge \mu_{\text{HC}}(x_3).\end{aligned}\quad (2.9)$$

$$\begin{aligned}\mu_{\text{BC}}(\sum E) = & \mu_{\text{BC}}(x_1) \wedge \mu_{\text{BC}}(x_2) \wedge \mu_{\text{C}}(x_3) \vee \\ & \mu_{\text{BC}}(x_1) \wedge \mu_{\text{C}}(x_2) \wedge \mu_{\text{BC}}(x_3) \vee \mu_{\text{C}}(x_1) \wedge \\ & \mu_{\text{BC}}(x_2) \wedge \mu_{\text{BC}}(x_3) \vee \mu_{\text{BC}}(x_1) \wedge \mu_{\text{BC}}(x_2) \wedge \mu_{\text{BC}}(x_3).\end{aligned}\quad (2.10)$$

$$\begin{aligned}\mu_{\text{B}}(\sum E) = & \mu_{\text{B}}(x_1) \wedge \mu_{\text{B}}(x_2) \wedge \mu_{\text{BC}}(x_3) \vee \mu_{\text{B}}(x_1) \wedge \mu_{\text{BC}}(x_2) \wedge \\ & \wedge \mu_{\text{B}}(x_3) \vee \mu_{\text{B}}(x_1) \wedge \mu_{\text{BC}}(x_2) \wedge \mu_{\text{BC}}(x_3) \vee \\ & \vee \mu_{\text{B}}(x_1) \wedge \mu_{\text{B}}(x_2) \wedge \mu_{\text{B}}(x_3).\end{aligned}\quad (2.11)$$

Застосування нечітких логічних рівнянь на кожному рівні ієрархії дозволяє формалізувати функції належності змінних та побудувати аналітичну модель оцінювання енергоефективності огорожувальних конструкцій.

2.3 Моделювання багатофакторіального процесу оцінювання організаційно-технічних рішень підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій

2.3.1 Формалізація та ієрархічна класифікація факторів впливу на енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель

Моделювання багатофакторного процесу прогнозування ефективності оцінювання організаційно-технічних рішень енергозбереження може базуватися на експертних оцінках, які мають якісний характер. Для створення експертної системи моделювання багатофакторного аналізу було використано математичний апарат, що базується на теорії нечіткої логіки [105-109].

Цей підхід являє собою систему взаємопов'язаних математичних моделей, алгоритмів та формалізованих методів, що дозволяють використовувати експертну та лінгвістичну інформацію для прогнозування ефективності управління проєктами енергозбереження залежно від впливу різних факторів [110 - 112].

Для встановлення ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на величину ефективності управління проєктами, було проведено їх класифікацію (рис. 2.3)

Застосування нечіткої логіки для експертного моделювання операторів «ЯКЩО-ТО» під час оцінювання організаційно-технічних рішень (ОТР) енергоефективності вимагає ідентифікації факторів через відповідні значення:

А - Організаційні фактори - відображають ступінь якості управління, координації та компетентності виконавців;

В - Технічні фактори - використовуються для оцінки правильності технічних рішень при влаштуванні утеплення, виконанні ремонтних робіт, реконструкції чи спорудженні огорожувальних конструкцій;

С - Економічні фактори – використовуються для оцінки економії енергії, інвестиційної привабливості, визначення вартості впровадження [113];

Д - Екологічні та експлуатаційні фактори враховують екологічність матеріалів, довговічність конструкцій, експлуатаційні ризики [114, 115].

За системного підходу для аналізу даного процесу лінгвістична змінна N – оцінка енергоефективності ОТР, яка буде характеризувати ефективність управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель, може бути подана у вигляді співвідношення:

$$N = f(A, B, C, D), \quad (2.12)$$

де А – лінгвістична змінна (ЛЗ), що описує організаційні фактори

В - ЛЗ, що описує технологічні фактори;

С - ЛЗ, що описує економічні фактори;

Д - ЛЗ, що описує екологічні та експлуатаційні фактори.

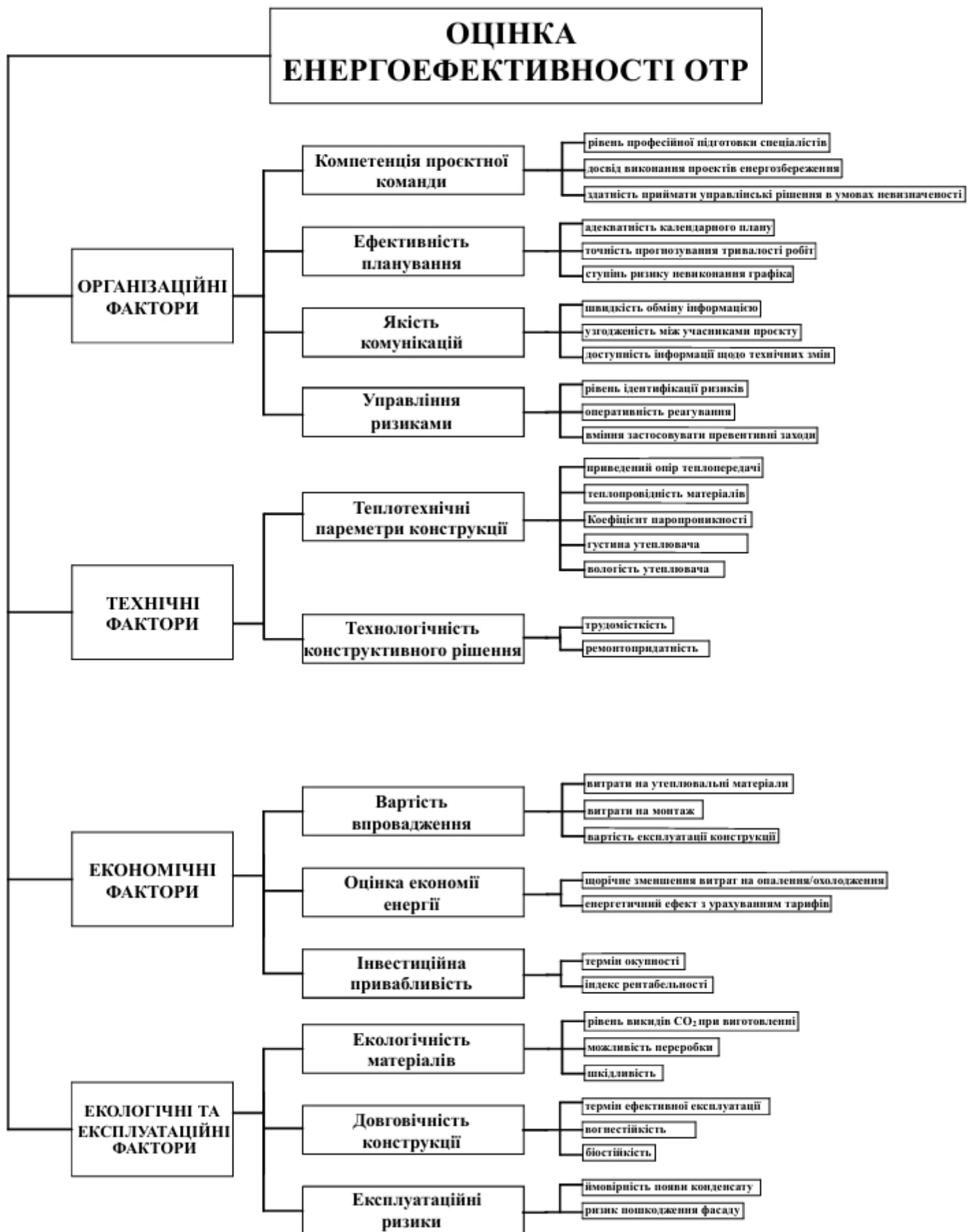


Рисунок 2.3 - Класифікація факторів, що впливають на управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель

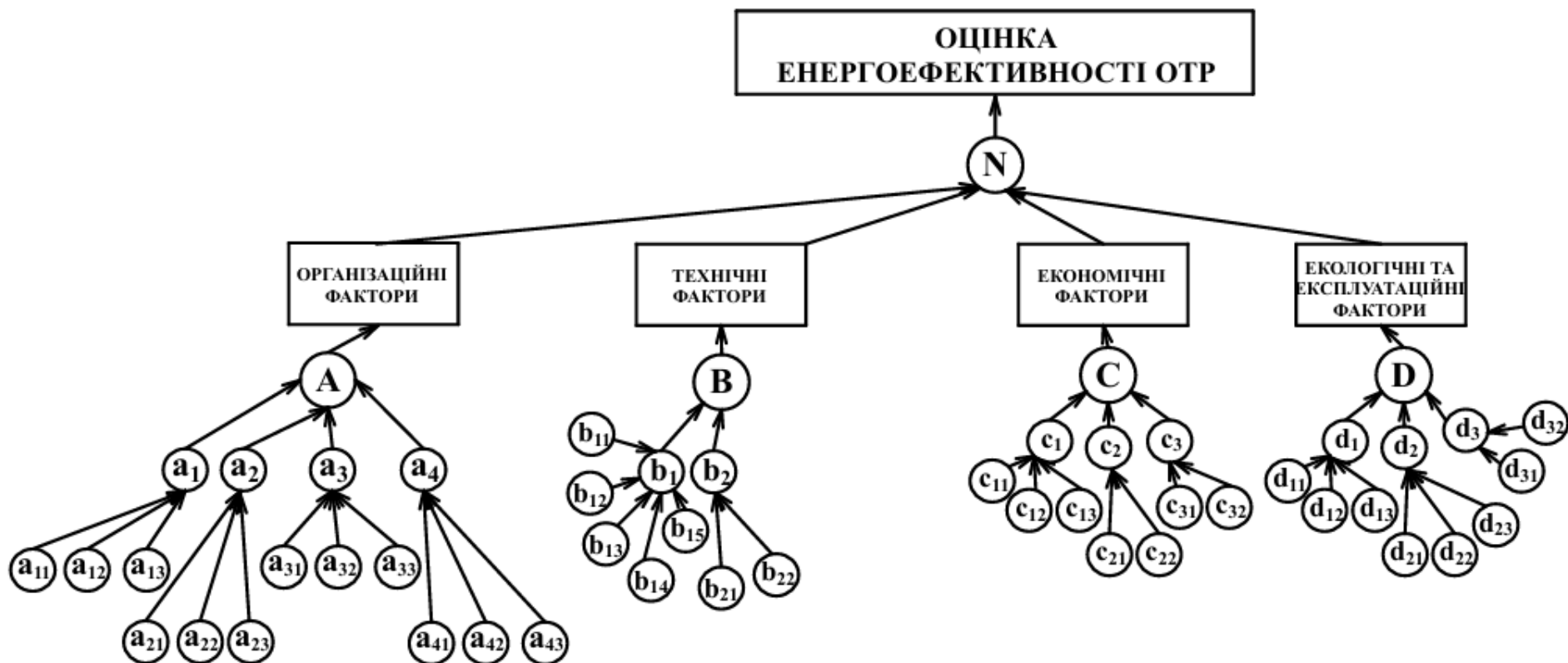


Рисунок 2.4 - Дерево логічного висновку ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель

ЛЗ, що описує організаційні фактори, у межах запропонованої моделі представлена математичним співвідношенням:

$$A = f(a_1, a_2, a_3, a_4), \quad (2.13)$$

де a_1 – лінгвістична змінна (ЛЗ), що описує компетенції проєктної команди;

a_2 – ЛЗ, що описує ефективність планування;

a_3 – ЛЗ, що описує якість комунікацій;

a_4 – ЛЗ, що описує управління ризиками.

ЛЗ, яка описує компетенції проєктної команди, може бути представлена співвідношенням:

$$a_1 = f(a_{11}, a_{12}, a_{13}), \quad (2.14)$$

де a_{11} – це показник ЛЗ, що описує рівень професійної підготовки спеціалістів;

a_{12} – ЛЗ, що описує досвід виконання проєктів енергозбереження;

a_{13} – ЛЗ, що описує здатність приймати управлінські рішення в умовах невизначеності.

В - ЛЗ, який описує технічні фактори, представлена співвідношенням:

$$B = f(b_1, b_2) \quad (2.15)$$

С - ЛЗ, яка описує економічні фактори, представлена співвідношенням

$$C = f(c_1, c_2, c_3) \quad (2.16)$$

Д - ЛЗ, що описує екологічні [117] та експлуатаційні фактори, представлена співвідношенням:

$$D = f(d_1, d_2, d_3) \quad (2.17)$$

Аналогічно описуються і представляються співвідношеннями інші фактори рисунку 2.3. За результатами аналізу ієрархічної сукупності відношень (2.12) - (2.17) сформовано дерево логічного висновку (рис. 2.4), вузли якого ідентифіковані відповідними номерами формул. Оцінювання значень лінгвістичних змінних, визначених у співвідношеннях (2.12) - (2.17), здійснюється з використанням системи якісних термінів: Н - низький; С - середній; В - високий. Кожен із зазначених термінів відповідає певній нечіткій множині, тобто окремій властивості, що інтерпретується як лінгвістичний терм. Перелік термінів оцінювання для лінгвістичних змінних наведено в таблиці 2.2.

Дерево логічного висновку (рис. 2.2), сформоване на основі класифікованих факторів, що впливають на рівень ефективності управління проектами, відображає систему вкладених операторів та їх ієрархічні взаємозв'язки. Кореневий вузол дерева відповідає показнику ймовірності енергоефективності, тоді як висячі вершини презентують фактори, що визначають величину цього показника.

Таблиця 2.2 - Фактори впливу як лінгвістичні зміни

Позначення та назва змінної	Універсальний набір	Умови оцінювання
a11 - рівень професійної підготовки спеціалістів	1...10 бали	Недостатній, середній, достатній
a12 – досвід виконання проєктів енергозбереження	0...100%	Низький, середній, високий
a13 – здатність приймати управлінські рішення в умовах невизначеності	0...100%	Низька, середня, висока
a21 - адекватність календарного плану	0...100%	Низька, середня, висока
a22 – точність прогнозування тривалості робіт	0...100%	Низька, середня, висока
a23 – ступінь ризику невиконання графіка	0...100%	Низький, середній, високий
a31 – швидкість обміну інформацією	1.....10 балів	Низька, середня, висока
a32 - узгодженість між учасниками проєкту	1.....10 балів	Низька, середня, висока
a33 – доступність інформації щодо технічних змін	1.....10 балів	Не відповідає, відповідає частково, відповідає
a41 – рівень ідентифікації ризиків	0...100%	Низький, середній, високий
a42 – оперативність реагування	0.....10 балів	Низька, середня, висока
a43- вміння застосовувати превентивні заходи	0.....10 балів	Низьке, середнє, високе
b11 - приведений опір теплопередачі	1...7 м ² ·К/Вт	Низький, середній, високий

Продовження таблиці 2.2

Позначення та назва змінної	Універсальний набір	Умови оцінювання
b12 - теплопровідність матеріалів	0,03...1,7 Вт/(м·К)	Низька, середня, висока
b13 - коефіцієнт паропроникності	0,01...0,31 мг/(м·год·Па)	Низький, середній, високий
b14 – густина утеплювача	8...220 кг/м	Низька, середня, висока
b15 – вологість утеплювача	0,3...10%	Низька, середня, висока
b21 – трудомісткість	0,5...8 люд.- год/м ²	Низька, середня, висока
b22 – ремонтпридатність	0...1	Низька, середня, висока
c11 - витрати на утеплювальні матеріали	150...1000 грн/м ²	Низькі, середні, високі
c12 - витрати на монтаж	200...2500 грн/м ²	Низькі, середні, високі
c13 - вартість експлуатації конструкції	5...80 грн/м ² ·рік	Низька, середня, висока
c21 - щорічне зменшення витрат на опалення/охолодження	10...120 кВт год/м ² ·рік	Низьке, середнє, високе
c22 - енергетичний ефект з урахуванням тарифів	100...2000 грн/м ² ·рік	Низький, середній, високий
c31 - термін окупності	3...25 років	Низький, середній, високий
c32 - індекс рентабельності	1...10	Низький, середній, високий
d11 - рівень викидів CO ₂ при виготовленні	10...300 кг CO ₂ /м ³	Низький, середній, високий
d12 - можливість переробки	0...100%	Низька, середня, висока
d13 - шкідливість	0...10 балів	Низька, середня, висока
d21 - термін ефективної експлуатації	15...50 років	Низький, середній, високий

Продовження таблиці 2.2

Позначення та назва змінної	Універсальний набір	Умови оцінювання
d22 -вогнестійкість	Г4...НГ клас	Низька, середня, висока
d23 - біостійкість	0...5 бали	Низька, середня, висока
d31 - ймовірність появи конденсату	0...80%	Низька, середня, висока
d32 -ризик пошкоджень фасаду	0...40%	Низький, середній, високий

Для оцінювання величин факторів впливу таблиці 2.2 використано результати роботи з експертами: провідні фахівці ТОВ «Подільський проектний інститут», фахівців - співвласників об'єднань багатоповерхових будівель, проектних та будівельних організацій, провідні науковці в галузі енергозбереження та вимоги і положення нормативно-законодавчої літератури (ДБН, ДСТУ і тощо).

Для обробки даних в нечіткій логіці пропонується заповнення анкети (Додаток А).

2.3.2 Побудова функцій належності нечітких оцінок впливу факторів.

Одним із інформаційних джерел для розроблення системи експертного моделювання з метою прийняття організаційно-технічних рішень у сфері енергозбереження є експертні оцінки, що мають якісний характер і можуть застосовуватися проектувальником. Запропонований метод до побудови функцій належності ґрунтується на трансформації нечітких оцінок впливу факторів у відповідні нечіткі терми [118, 119]. Формування нечітких термів здійснюється на етапі фазифікації шляхом задання їх на відповідних універсальних множинах.

Нечітка множина, що використовується для формалізації відповідного терму. Терм визначається як сукупність упорядкованих пар [103, 105]:

$$\tilde{S} = \left\{ \frac{\mu_s(u_1)}{u_1}, \frac{\mu_s(u_2)}{u_2}, \dots, \frac{\mu_s(u_n)}{u_n} \right\}, \quad (2.18)$$

де $\{u_1, u_2, \dots, u_n\} = U$ – універсальна множина, на якій визначено нечітку множину $S \in U$;

$\mu_s(u_{та})$ - ступінь належності елемента $u_{та} \in U$ до нечіткої множини $\tilde{S}$.

Невідомою функцією належності буде множина значень $\mu_s(u_{та})$ для всіх $u = \overline{1, n}$, що необхідно визначити. Метод розв'язання цієї задачі заснований на розподілі ступенів належності універсальної множини за їхніми рангами. Під рангами елемента $u_i \in U$ розуміється число $r_s(u_i)$, яке характеризується значущістю цього елемента у формуванні властивості, що описується нечітким терміном $\tilde{S}$. У цьому випадку робиться припущення, що чим вищий ранг елемента, тим більший ступінь його належності.

Правило розподілу ступенів належності наведено у вигляді співвідношення [103]:

$$\frac{\mu_1}{r_1} = \frac{\mu_2}{r_2} = \frac{\mu_n}{r_n}, \quad (2.19)$$

задається ще умова нормування

$$\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n = 1, \quad (2.20)$$

де у формула (2.19), (2.20) прийнято такі позначення:

$$r_i = r_s(u_i); \quad \mu_i = \mu_s(u_i); \quad i = \overline{1, n}.$$

Значення ступенів належності $\mu_s(u_{та})$ елементів $u_{та} \in U$ до відповідно нечіткого терму $\tilde{S}$ обчислюється за наведеними формулами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_1 = \left(1 + \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_3}{r_1} + \dots + \frac{r_n}{r_1} \right)^{-1}; \\ \mu_2 = \left(\frac{r_1}{r_2} + 1 + \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{r_n}{r_2} \right)^{-1} \\ \dots \dots \dots \\ \mu_n = \left(\frac{r_1}{r_n} + \frac{r_2}{r_n} + \frac{r_3}{r_n} + \dots + 1 \right)^{-1}. \end{array} \right. \quad (2.21)$$

Згідно з формулами (2.21) , ступінь належності $\mu_S(u_i)$ елементів $u_{ta} \in (U)$ для нечіткого терма визначається відносними оцінками рангів $r_i / r_j = a_{ij}$; та, $j = \overline{1, n}$, які створюють матрицю:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{r_2}{r_1} & \frac{r_3}{r_1} & \dots & \frac{r_n}{r_1} \\ \frac{r_1}{r_2} & 1 & \frac{r_3}{r_2} & \dots & \frac{r_n}{r_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{r_1}{r_n} & \frac{r_2}{r_n} & \frac{r_3}{r_n} & \dots & 1 \end{bmatrix} . \quad (2.22)$$

Враховуючи відомі елементи одного рядка матриці (2.22), розраховують елементи всіх інших рядків. Довільний елемент a_{ij} при відомих елементи a_{kj} , $k, i = \overline{1, n}$ певного r - го рядка визначаємо наступним чином

$$a_{ij} = a_{kj} / a_{ki} , \quad i, j, k = \overline{1, n} \quad (2.23)$$

використовується 9-бальна шкала Сааті [120], яка формується наступним чином:

$$a_{ij} = r_i / r_j = \begin{cases} 1, & \text{за відсутності переваги } r_i \text{ над } r_j ; \\ 3, & \text{за незначною перевагою } r_i \text{ над } r_j ; \\ 5, & \text{за незначною перевагою } r_i \text{ над } r_j ; \\ 7, & \text{за незначною перевагою } r_i \text{ над } r_j ; \\ 9, & \text{за незначною перевагою } r_i \text{ над } r_j ; \\ 2, 4, 6, 8 & - \text{ проміжні порівняльні оцінки.} \end{cases}$$

Запропонований метод реалізовано з використанням алгоритмічної процедури побудови функції належності, наведеного на рис. 2.5.

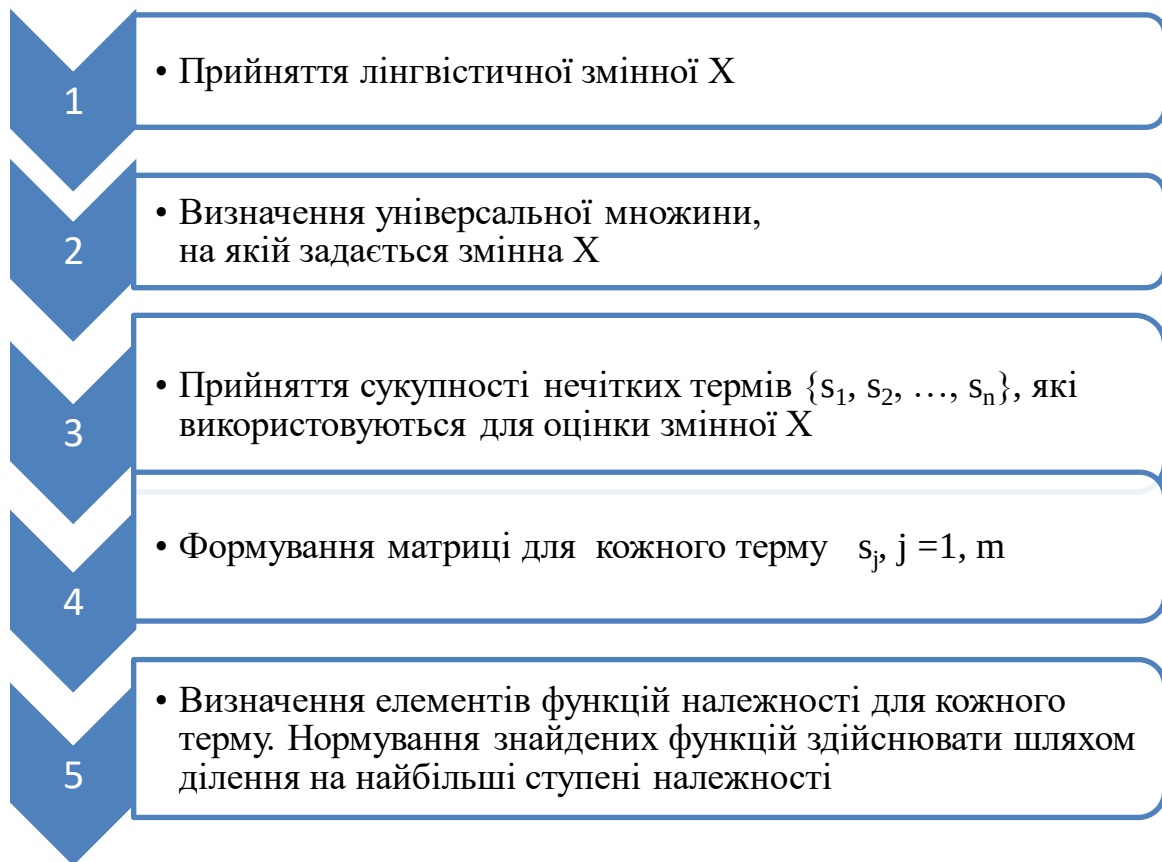


Рисунок 2.5 – Етапи побудови функції належності

Запропонована методологія побудови функції належності детально розглядається на прикладі фактора b15 -вологість. Для решти факторів, що впливають на цінність ОТР, наведено лише кінцеві результати у вигляді функцій належності (рис. 2.6-2.10, додаток Б).

1. Фактор b15 –вологість утеплювача

$$U(b15) = [0,3....10] \%$$

Для лінгвістичної оцінки фактора b15 використовується терм -множина:

$$T(b15) = < \text{Низька, середня, висока} >.$$

Матриця відображає попарні порівняння різних величин по відношенню їх до терма «низький», має вигляд

$$A_{\text{„низька”}}(b15) = \begin{array}{c|ccc} & u_1 & u_2 & u_3 \\ \hline u_1 & 1 & (9/2)/7 & 1/7 \\ u_2 & 7/(9/2) & 1 & 2/9 \\ u_3 & 7 & 9/2 & 1 \end{array} \quad (2.24)$$

При формуванні цієї матриці (2.24) експертами визначалися лише елементи останньої стрічки, елементи двох інших стрічок розраховуємо за рівнянням (2.23).

До матриці $A_{\text{„низька”}}(b15)$ застосовуючи співвідношення (2.21), отримуємо ступені належності елементів $u_1 \dots u_3$ до терму «низький»:

$$\mu_{\text{низька}}(u_1) = \frac{1}{1 + \frac{4,5}{7} + \frac{1}{7}} = 0,56;$$

$$\mu_{\text{низька}}(u_2) = \frac{1}{\frac{7}{4,5} + 1 + \frac{2}{9}} = 0,36;$$

$$\mu_{\text{низька}}(u_3) = \frac{1}{7 + \frac{9}{2} + 1} = 0,08.$$

Матриці попарного порівняння для термів, "середній", "високий" та їх відповідні ступенів належності визначені і представлені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Матриці попарних порівнянь та ступенів належності

Терми для оцінки	Матриця парних порівнянь	Ступені належності									
середня	<table border="1"> <tr> <td>1</td><td>9/5</td><td>1</td></tr> <tr> <td>5/9</td><td>1</td><td>5/9</td></tr> <tr> <td>1</td><td>9/5</td><td>1</td></tr> </table>	1	9/5	1	5/9	1	5/9	1	9/5	1	$\mu(u1) = 0,26$ $\mu(u2) = 0,47$ $\mu(u3) = 0,26$
1	9/5	1									
5/9	1	5/9									
1	9/5	1									
висока	<table border="1"> <tr> <td>1</td><td>7/2</td><td>8</td></tr> <tr> <td>2/7</td><td>1</td><td>2/7</td></tr> <tr> <td>1/8</td><td>(7/2)/8</td><td>1</td></tr> </table>	1	7/2	8	2/7	1	2/7	1/8	(7/2)/8	1	$\mu(u1) = 0,08$ $\mu(u2) = 0,28$ $\mu(u3) = 0,64$
1	7/2	8									
2/7	1	2/7									
1/8	(7/2)/8	1									

Отримані результати функції належності нормалізуються до одиниці шляхом ділення на найбільший ступінь належності. В результаті різні рівні мають вигляд таких нечітких множин:

- Рівень готовності до терму "низький"

$$= \left\{ \frac{1}{0,3}; \frac{0,64}{5}; \frac{0,14}{10} \right\};$$

- Рівень готовності до терму "середній"

$$= \left\{ \frac{0,56}{0,3}; \frac{1}{5}; \frac{0,56}{10} \right\};$$

- Рівень готовності до терму "високий"

$$= \left\{ \frac{0,13}{0,3}; \frac{0,44}{5}; \frac{1}{10} \right\}.$$

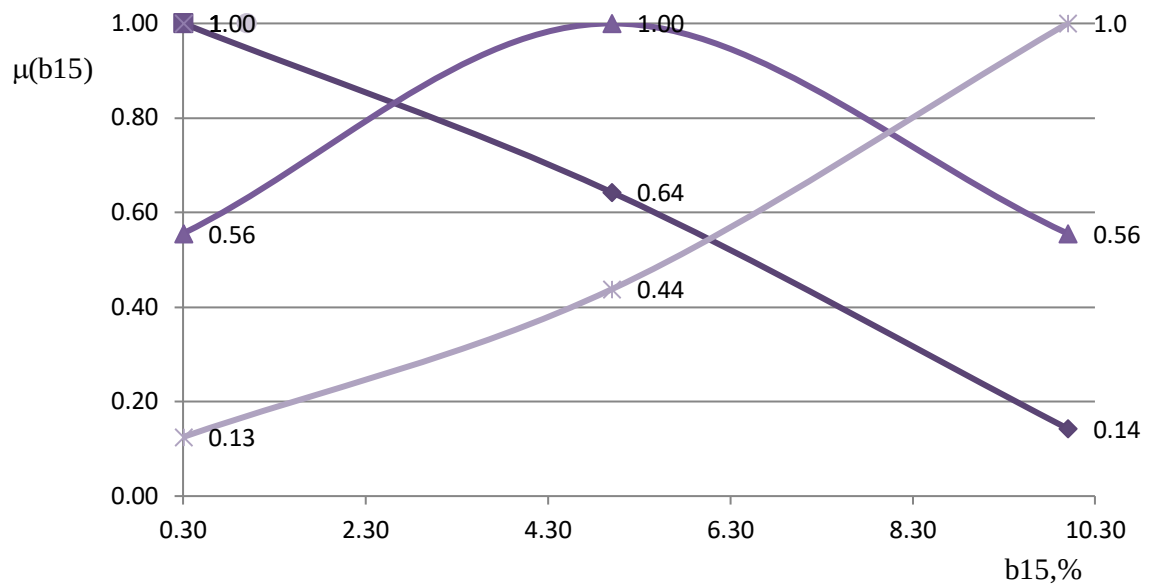


Рисунок 2.6 – Функція належності для лінгвістичної змінної b15 – вологість

Нечіткі множини описані за допомогою графіків, які представлено на рис. 2.7 – 2.10, для групи факторів А – організаційні фактори. Для всіх інших факторів функції належності наведені на рисунках додатку Б.

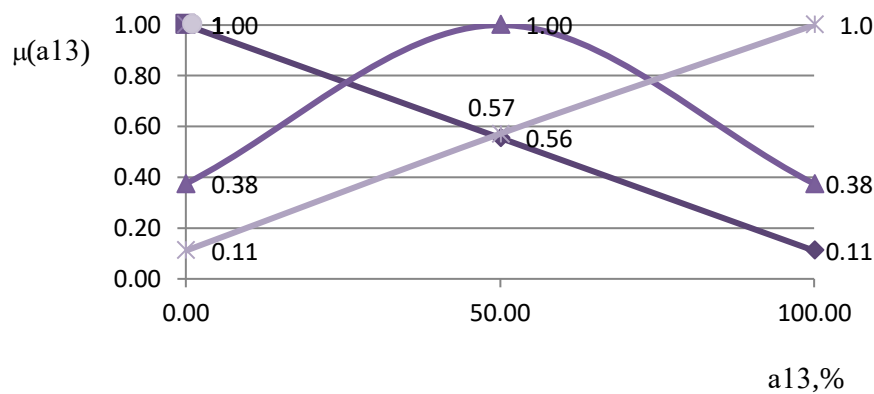
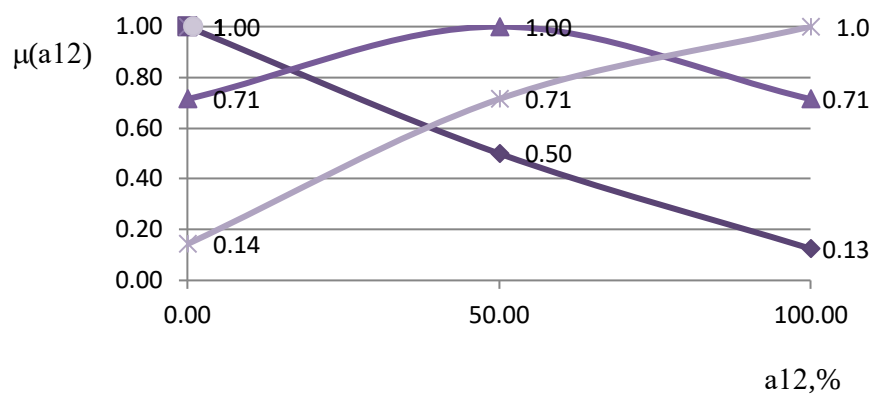
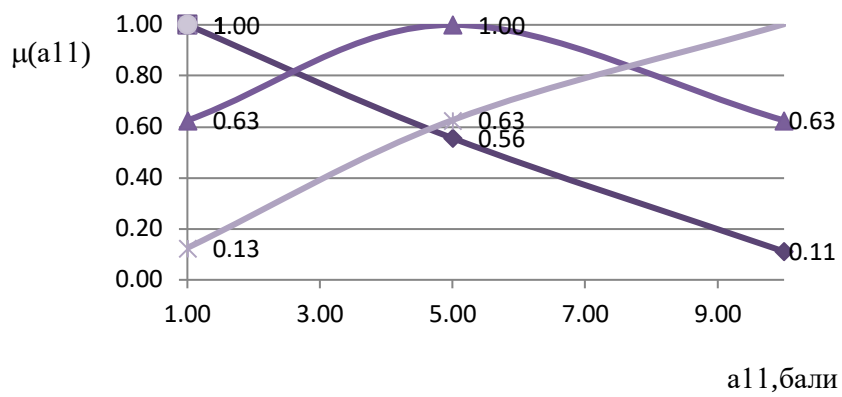


Рисунок 2.7 – Функції належності для лінгвістичних змінних групи – компетенція проєктної команди: $a11$ - рівень професійної підготовки спеціалістів; $a12$ – досвід виконання проєктів енергозбереження; $a13$ – здатність приймати управлінські рішення в умовах невизначеності.

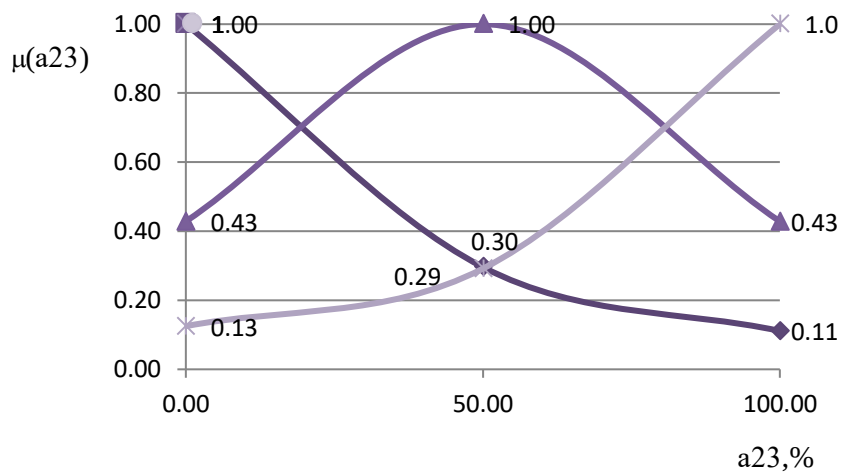
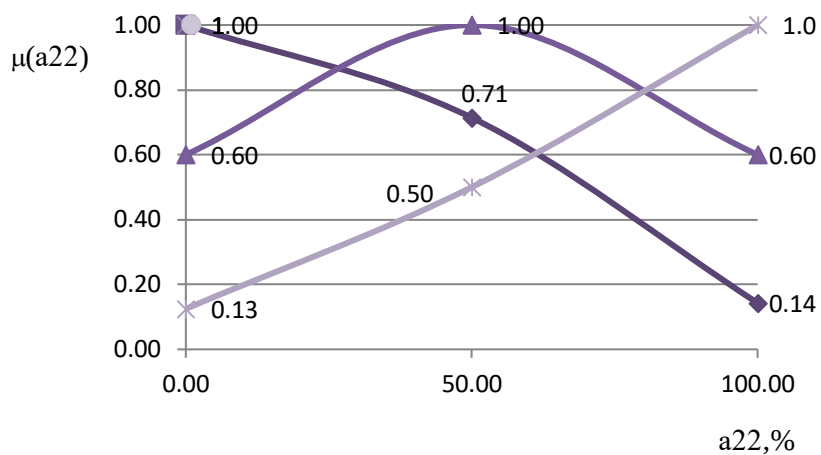
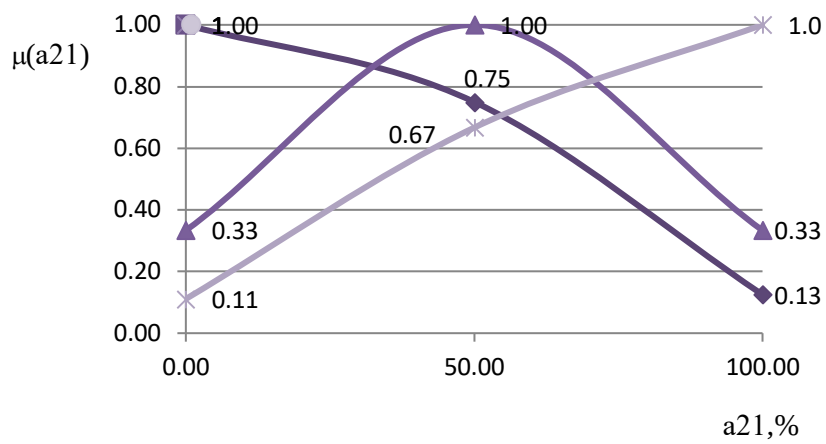


Рисунок 2.8 – Функції належності для лінгвістичних змінних групи – ефективність планування: a_{21} - адекватність календарного плану; a_{22} – точність прогнозування тривалості робіт; a_{23} – ступінь ризику невиконання графіка.

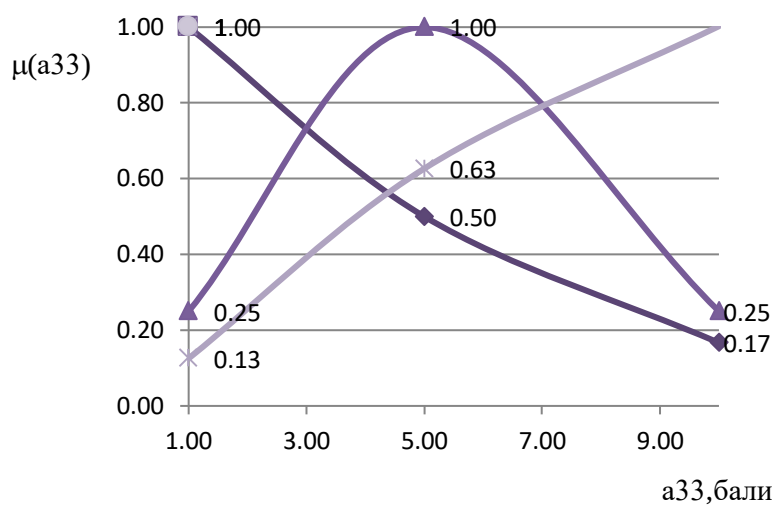
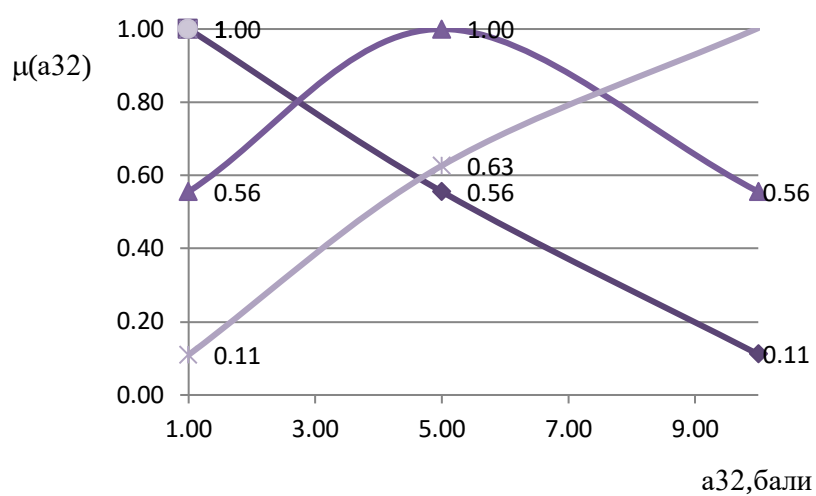
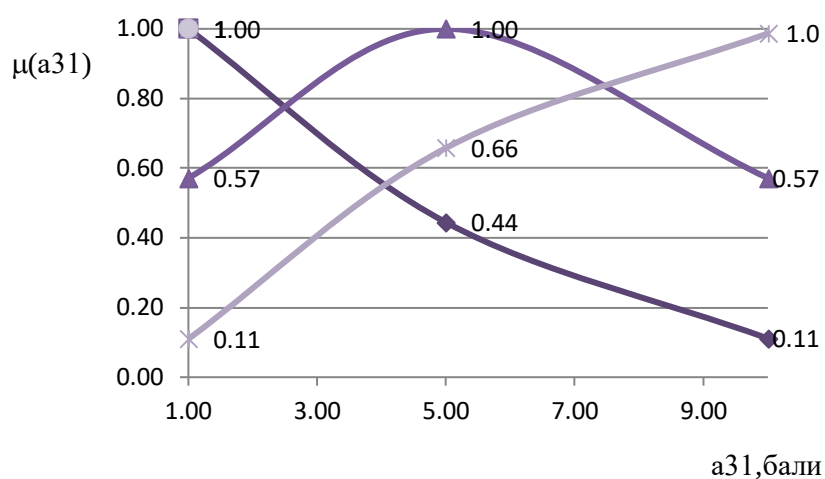


Рисунок 2.9 – Функції належності для лінгвістичних змінних групи – якість комунікацій: $a31$ - швидкість обміну інформацією; $a32$ – узгодженість між учасниками проєкту; $a33$ – доступність інформації щодо технічних змін.

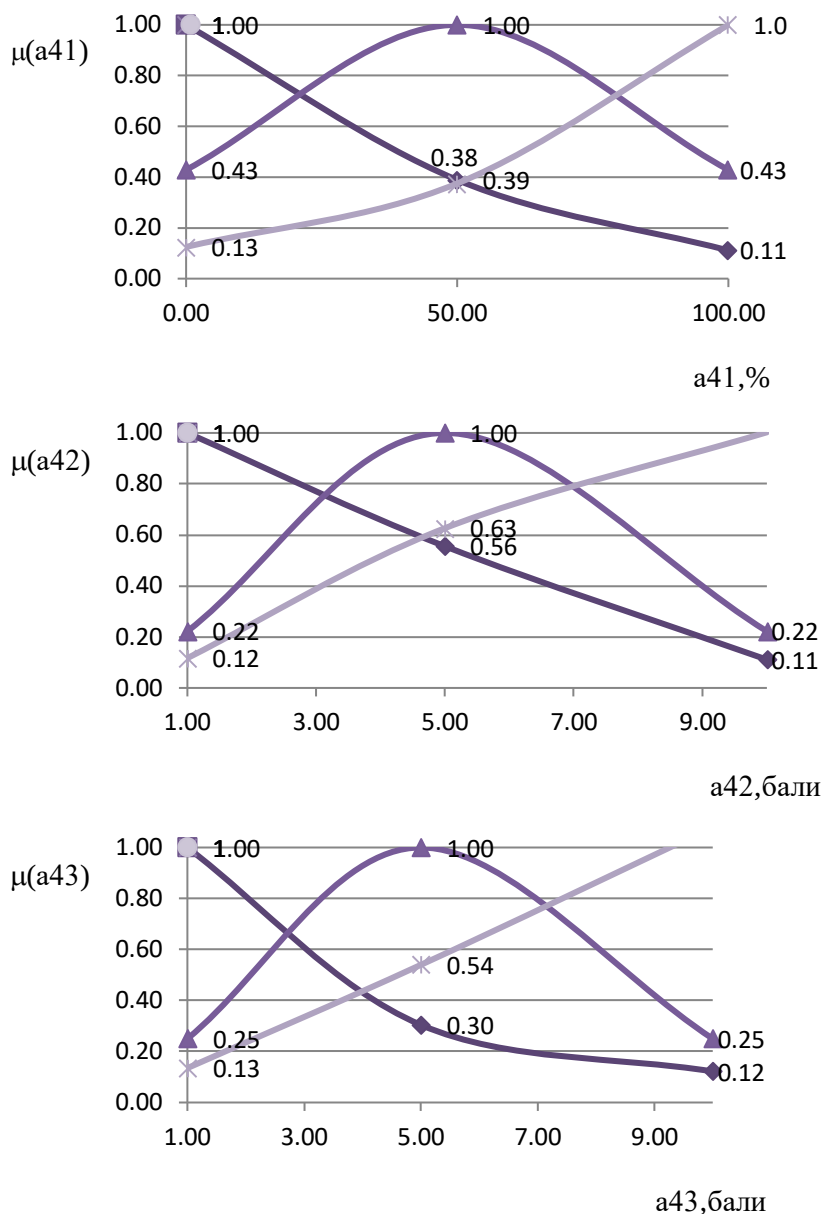


Рисунок 2.10 – Функції належності для лінгвістичних змінних групи – управління ризиками: a_{41} рівень ідентифікації ризиків; a_{42} – оперативність реагування; a_{43} – вміння застосовувати превентивні заходи.

2.3.3 Моделювання системи прийняття рішень на системному рівні

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що встановлюють зв'язок між оцінкою енергоефективності ОТР (N) з параметрами: A (Організаційні фактори), B (Технічні фактори), C (Економічні фактори), D (Екологічні та експлуатаційні фактори), виконується за допомогою системи термів:

$$T(N) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$$

$$T(A) = \langle \text{низькі, середні, високі} \rangle;$$

$T(B) = \langle \text{низькі, середні, високі} \rangle;$

$T(C) = \langle \text{низькі, середні, високі} \rangle;$

$T(D) = \langle \text{низькі, середні, високі} \rangle.$

Нечітка матриця знань, що враховує введені якісні терми для моделювання залежності (2.12), наведена в таблиці 2.4

Таблиця 2.4 - Матриця знань для залежності (2.12)

Якщо	Організаційні фактори	Н	Н	Н	С	С	С	С	В	В
	Технологічні фактори	Н	Н	Н	С	С	С	В	В	В
	Економічні фактори	Н	Н	С	С	Н	Н	В	С	В
	Екологічні та експлуатаційні фактори	Н	С	Н	В	С	Н	В	В	С
То	Оцінка енергоефективності ОТР	Низька (Н)			Середня (С)			Висока (В)		

Лінгвістичні твердження, наведені в таблиці 2.4, відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних для відповідного терма:

$$\mu_N(N) = \mu_N(A) \wedge \mu_N(B) \wedge \mu_N(C) \wedge \mu_N(D) \vee$$

$$\mu_N(A) \wedge \mu_N(B) \wedge \mu_N(C) \wedge \mu_C(D) \vee$$

$$\mu_N(A) \wedge \mu_N(B) \wedge \mu_C(C) \wedge \mu_N(D); \quad (2.25)$$

$$\mu_C(N) = \mu_C(A) \wedge \mu_C(B) \wedge \mu_C(C) \wedge \mu_V(D) \vee$$

$$\mu_C(A) \wedge \mu_C(B) \wedge \mu_N(C) \wedge \mu_C(D) \vee$$

$$\mu_C(A) \wedge \mu_C(B) \wedge \mu_N(C) \wedge \mu_N(D); \quad (2.26)$$

$$\mu_V(N) = \mu_C(A) \wedge \mu_V(B) \wedge \mu_V(C) \wedge \mu_V(D) \vee$$

$$\mu_V(A) \wedge \mu_V(B) \wedge \mu_C(C) \wedge \mu_V(D) \vee$$

$$\mu_V(A) \wedge \mu_V(B) \wedge \mu_V(C) \wedge \mu_C(D). \quad (2.27)$$

2.3.4 Моделювання системи прийняття рішень з урахуванням організаційних факторів

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язують організаційні фактори (А) з компетенцією проєктної команди (а1), ефективністю планування (а2), якістю комунікаціями (а3), управлінням ризиками (а4) виконується за допомогою системи термів:

$T(a_1) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$

$T(a_2) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$

$T(a_3) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$

$T(a_4) = \langle \text{низьке, середнє, високе} \rangle.$

Нечітка матриця знань з урахуванням введених якісних членів для моделювання залежності (2.13) наведена в таблиці 2.5

Таблиця 2.5 – Матриця знань для залежностей (2.13)

Якщо	Компетенція проєктної команди	Н	Н	Н	Н	С	С	В	С	В
	Ефективність планування	Н	Н	С	С	С	Н	В	В	С
	Якість комунікацій	Н	С	Н	С	Н	Н	В	В	В
	Управління ризиками	Н	Н	Н	С	С	С	В	В	В
То	Організаційні фактори	Низькі (Н)			Середні (С)			Високі (В)		

Лінгвістичні твердження, наведені в таблиці 2.5, відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних для відповідного терма:

$$\begin{aligned} \mu_H(A) = & \mu_H(a_1) \wedge \mu_H(a_2) \wedge \mu_H(a_3) \wedge \mu_H(a_4) \vee \mu_H(a_1) \wedge \mu_H(a_2) \wedge \mu_C(a_3) \wedge \mu_H(a_4) \vee \\ & \mu_H(a_1) \wedge \mu_C(a_2) \wedge \mu_H(a_3) \wedge \mu_H(a_4); \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(A) = & \mu_H(a_1) \wedge \mu_C(a_2) \wedge \mu_C(a_3) \wedge \mu_C(a_4) \vee \mu_H(a_1) \wedge \mu_C(a_2) \wedge \mu_C(a_3) \wedge \mu_H(a_4) \vee \\ & \mu_C(a_1) \wedge \mu_H(a_2) \wedge \mu_H(a_3) \wedge \mu_C(a_4); \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\mu_B(A) = \mu_B(a1) \wedge \mu_B(a2) \wedge \mu_B(a3) \wedge \mu_B(a4) \vee \mu_C(a1) \wedge \mu_B(a2) \wedge \mu_B(a3) \wedge \mu_B(a4) \vee \mu_B(a1) \wedge \mu_C(a2) \wedge \mu_B(a3) \wedge \mu_B(a4). \quad (2.30)$$

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язують компетенції проєктної команди (a1), з рівнем професійної підготовки спеціалістів (a11), досвідом виконання проєктів (a12), здатністю приймати управлінські рішення в умовах невизначеності (a13) виконується за допомогою системи термів:

$T(a11) = \langle \text{недостатній, середній, достатній} \rangle;$

$T(a12) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle;$

$T(a13) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle.$

Нечітка матриця знань з урахуванням введених якісних членів для моделювання залежності (2.14) наведена в таблиці 2.6

Таблиця 2.6 – Матриця знань для залежностей (2.14)

Якщо	Рівень професійної підготовки спеціалістів	Н	С	Н	С	С	С	В	С	В
	Досвід виконання проєктів енергозбереження	Н	Н	С	С	С	Н	В	В	С
	Здатність приймати управлінські рішення в умовах невизначеності	Н	Н	Н	С	Н	С	В	В	В
То	Компетенції проєктної команди	Низькі (Н)			Середні (С)			Високі (В)		

Лінгвістичні твердження, наведені в таблиці 2.6, відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних для відповідного терма:

$$\mu_H(a1) = \mu_H(a11) \wedge \mu_H(a12) \wedge \mu_H(a13) \vee \mu_C(a11) \wedge \mu_H(a12) \wedge \mu_H(a13) \vee \mu_H(a11) \wedge \mu_C(a12) \wedge \mu_H(a13); \quad (2.31)$$

$$\mu_C(a1) = \mu_C(a11) \wedge \mu_C(a12) \wedge \mu_C(a13) \vee \mu_C(a11) \wedge \mu_C(a12) \wedge \mu_H(a13) \vee \mu_C(a11) \wedge \mu_H(a12) \wedge \mu_C(a13); \quad (2.32)$$

$$\mu_B(a1) = \mu_B(a11) \wedge \mu_B(a12) \wedge \mu_B(a13) \vee \mu_C(a11) \wedge \mu_B(a12) \wedge \mu_B(a13) \vee \mu_B(a11) \wedge \mu_C(a12) \wedge \mu_B(a13). \quad (2.33)$$

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язують ефективність планування (a2), з адекватністю календарного плану (a21), точністю прогнозування тривалості робіт (a22), ступенем ризику невиконання графіка (a23) виконується за допомогою системи термів:

$T(a21) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$

$T(a22) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$

$T(a23) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle.$

Нечітка матриця знань з урахуванням введених якісних членів для моделювання залежності:

$$a2 = f(a21, a22, a23), \quad (2.34)$$

наведена в таблиці 2.7

Таблиця 2.7 – Матриця знань для залежностей (2.34)

Якщо	Адекватність календарного плану	Н	С	Н	С	С	С	В	С	В
	Точність прогнозування тривалості робіт	Н	Н	С	С	С	Н	В	В	С
	Ступінь ризику невиконання графіка	Н	Н	Н	С	Н	С	В	В	В
То	Ефективність планування	Низька (Н)			Середня (С)			Висока (В)		

Лінгвістичні твердження, наведені в таблиці 2.7, відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних для відповідного терма:

$$\mu_H(a2) = \mu_H(a21) \wedge \mu_H(a22) \wedge \mu_H(a23) \vee \mu_C(a21) \wedge \mu_H(a22) \wedge \mu_H(a23) \vee \mu_H(a21) \wedge \mu_C(a22) \wedge \mu_H(a23); \quad (2.35)$$

$$\mu_C(a2) = \mu_C(a21) \wedge \mu_C(a22) \wedge \mu_C(a23) \vee \mu_C(a21) \wedge \mu_C(a22) \wedge \mu_H(a23) \vee \mu_C(a21) \wedge \mu_H(a22) \wedge \mu_C(a23); \quad (2.36)$$

$$\mu_B(a2) = \mu_B(a21) \wedge \mu_B(a22) \wedge \mu_B(a23) \vee \mu_C(a21) \wedge \mu_B(a22) \wedge \mu_B(a23) \vee \mu_H(a21) \wedge \mu_C(a22) \wedge \mu_B(a23). \quad (2.37)$$

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язують якість комунікацій (а3), з швидкістю обміном інформацією (а31), узгодженістю між учасниками проєкту (а32), доступністю інформації щодо технічних змін (а33) виконується за допомогою системи термів:

$T(a31) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$

$T(a32) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$

$T(a33) = \langle \text{не відповідає, відповідає частково, відповідає} \rangle.$

Нечітка матриця знань з урахуванням введених якісних членів для моделювання залежності:

$$a3 = f(a31, a32, a33), \quad (2.38)$$

наведена в таблиці 2.8

Таблиця 2.8 – Матриця знань для залежностей (2.38)

Якщо	Швидкість обміну інформацією	Н	С	Н	С	С	С	В	С	В
	Узгодженість між учасниками проєкту	Н	Н	С	С	С	Н	В	В	С
	Доступність інформації щодо технічних змін	НВ	НВ	НВ	ВЧ	Н	ВЧ	В	В	В
То	Якість комунікацій	Низька (Н)			Середня (С)			Висока (В)		

Лінгвістичні твердження, наведені в таблиці 2.8, відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних для відповідного терма:

$$\mu_H(a3) = \mu_H(a31) \wedge \mu_H(a32) \wedge \mu_{HB}(a33) \vee \mu_C(a31) \wedge \mu_H(a32) \wedge \mu_{HB}(a33) \vee \mu_H(a31) \wedge \mu_C(a32) \wedge \mu_{HB}(a33); \quad (2.39)$$

$$\mu_C(a3) = \mu_C(a31) \wedge \mu_C(a32) \wedge \mu_{VC}(a33) \vee \mu_{HB}(a31) \wedge \mu_C(a32) \wedge \mu_H(a33) \vee \mu_C(a31) \wedge \mu_H(a32) \wedge \mu_{VC}(a33); \quad (2.40)$$

$$\mu_B(a3) = \mu_B(a31) \wedge \mu_B(a32) \wedge \mu_B(a33) \vee \mu_C(a31) \wedge \mu_B(a32) \wedge \mu_B(a33) \vee \mu_B(a31) \wedge \mu_C(a32) \wedge \mu_B(a33). \quad (2.41)$$

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язують управління ризиками (а4), з рівнем ідентифікації ризиків (а41), оперативністю реагування (а42), вмінням застосовувати превентивні заходи (а43) виконується за допомогою системи термів:

$T(a41) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle;$

$T(a42) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$

$T(a43) = \langle \text{низьке, середнє, високе} \rangle.$

Нечітка матриця знань з урахуванням введених якісних членів для моделювання залежності:

$$a4 = f(a41, a42, a43), \quad (2.42)$$

наведена в таблиці 2.9

Таблиця 2.9 – Матриця знань для залежностей (2.42)

Якщо	Рівень ідентифікації ризиків	Н	С	Н	С	Н	С	В	С	В
	Оперативність реагування	Н	Н	Н	С	С	Н	В	В	С
	Вміння застосовувати превентивні заходи	Н	Н	С	С	С	С	В	В	В
То	Управління ризиками	Низька (Н)			Середня (С)			Висока (В)		

Лінгвістичні твердження, наведені в таблиці 2.9, відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних для відповідного терма:

$$\begin{aligned} \mu_H(a4) &= \mu_H(a41) \wedge \mu_H(a42) \wedge \mu_H(a43) \vee \mu_C(a41) \wedge \mu_H(a42) \wedge \mu_H(a43) \vee \\ &\mu_H(a41) \wedge \mu_H(a42) \wedge \mu_C(a43); \end{aligned} \quad (2.43)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(a4) &= \mu_C(a41) \wedge \mu_C(a42) \wedge \mu_C(a43) \vee \mu_H(a41) \wedge \mu_C(a42) \wedge \mu_C(a43) \vee \\ &\mu_C(a41) \wedge \mu_H(a42) \wedge \mu_C(a43); \end{aligned} \quad (2.44)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(a4) &= \mu_B(a41) \wedge \mu_B(a42) \wedge \mu_B(a43) \vee \mu_C(a41) \wedge \mu_B(a42) \wedge \mu_B(a43) \vee \\ &\mu_B(a41) \wedge \mu_C(a42) \wedge \mu_B(a43). \end{aligned} \quad (2.45)$$

2.3.5 Моделювання системи прийняття рішень з урахуванням технічних факторів

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язують технічні фактори (B) з теплотехнічними параметрами (b1), технологічністю конструктивного рішення (b2), виконується за допомогою системи термінів:

$T(b1) = \langle \text{низькі, середні, високі} \rangle;$

$T(b2) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle.$

Нечітка матриця знань з урахуванням введених якісних членів для моделювання залежності (2.15) наведена в Додатку В таблиці В.1.

Лінгвістичні твердження, наведені в таблиці В.1, відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних для відповідного терма:

$$\mu_H(B) = \mu_H(b1) \wedge \mu_H(b2) \vee \mu_C(b1) \wedge \mu_H(b2) \wedge \mu_H(b1) \wedge \mu_C(b2); \quad (2.46)$$

$$\mu_C(B) = \mu_C(b1) \wedge \mu_C(b2); \quad (2.47)$$

$$\mu_B(B) = \mu_B(b1) \wedge \mu_B(b2) \vee \mu_C(b1) \wedge \mu_B(b2) \vee \mu_B(b1) \wedge \mu_C(b2). \quad (2.48)$$

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язують теплотехнічні параметри (b1), з приведеним опором теплопередачі (b11), теплопровідністю матеріалів (b12),

коефіцієнтом паропроникності (b13), густиною утеплювача (b14), вологістю утеплювача (b15) виконується за допомогою системи термів:

$$T(b11) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle;$$

$$T(b12) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$$

$$T(b13) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle;$$

$$T(b14) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$$

$$T(b15) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle.$$

Нечітка матриця знань з урахуванням введених якісних членів для моделювання залежності:

$$b1 = f(b11, b12, b13, b14, b15), \quad (2.49)$$

наведена в таблиці Б.2

Лінгвістичні твердження, наведені в таблиці В.2, відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних для відповідного терма:

$$\begin{aligned} \mu_H(b1) = & \mu_H(b11) \wedge \mu_V(b12) \wedge \mu_H(b13) \wedge \mu_C(b14) \wedge \mu_V(b15) \vee \mu_C(b11) \wedge \mu_V(b12) \wedge \\ & \mu_H(b13) \wedge \mu_C(b14) \wedge \mu_V(b15) \vee \mu_H(b11) \wedge \mu_C(b12) \wedge \mu_H(b13) \wedge \mu_H(b14) \wedge \mu_C(b15); \end{aligned} \quad (2.50)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(b1) = & \mu_C(b11) \wedge \mu_C(b12) \wedge \mu_C(b13) \wedge \mu_C(b14) \wedge \mu_C(b15) \vee \mu_C(b11) \wedge \mu_C(b12) \wedge \\ & \mu_H(b13) \wedge \mu_C(b14) \wedge \mu_C(b15) \vee \mu_C(b11) \wedge \mu_H(b12) \wedge \mu_C(b13) \wedge \mu_C(b14) \wedge \mu_C(b15); \end{aligned} \quad (2.51)$$

$$\begin{aligned} \mu_V(b1) = & \mu_V(b11) \wedge \mu_H(b12) \wedge \mu_V(b13) \wedge \mu_V(b14) \wedge \mu_V(b15) \vee \mu_C(b11) \wedge \mu_H(b12) \wedge \\ & \mu_V(b13) \wedge \mu_V(b14) \wedge \mu_H(b15) \vee \mu_V(b11) \wedge \mu_C(b12) \wedge \mu_V(b13) \wedge \mu_V(b14) \wedge \mu_C(b15); \end{aligned} \quad (2.52)$$

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язують технологічність конструктивного рішення (b2), з трудомісткістю (b21), ремонтпридатністю (b22):

$$T(b21) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$$

$$T(b22) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle.$$

Нечітка матриця знань з урахуванням введених якісних членів для моделювання залежності:

$$b2 = f(b21, b22), \quad (2.53)$$

наведена в таблиці В.3

Лінгвістичні твердження, наведені в таблиці В.3, відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних для відповідного терма:

$$\mu_H(b2) = \mu_B(b21) \wedge \mu_H(b22) \vee \mu_C(b21) \wedge \mu_H(b22) \vee \mu_B(b21) \wedge \mu_C(b22); \quad (2.54)$$

$$\mu_C(b2) = \mu_C(b21) \wedge \mu_C(b22); \quad (2.55)$$

$$\mu_B(b2) = \mu_H(b21) \wedge \mu_B(b22) \vee \mu_C(b21) \wedge \mu_B(b22) \vee \mu_H(b21) \wedge \mu_C(b22); \quad (2.56)$$

2.4.6 Моделювання системи прийняття рішень з урахуванням економічних факторів

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язують економічні фактори (С) з вартістю впровадження (с1), оцінкою економії енергії (с2), інвестиційною привабливістю (с3) виконується за допомогою системи термінів:

$$T(c1) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$$

$$T(c2) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$$

$$T(c3) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle.$$

Нечітка матриця знань з урахуванням введених якісних членів для моделювання залежності (2.16) наведена в Додатку В таблиці В.4.

Лінгвістичні твердження, наведені в таблиці В.4, відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних для відповідного терма:

$$\begin{aligned} \mu_H(C) = & \mu_H(c1) \wedge \mu_H(c2) \wedge \mu_H(c3) \vee \mu_H(c1) \wedge \mu_H(c2) \wedge \mu_C(c3) \vee \\ & \mu_H(c1) \wedge \mu_C(c2) \wedge \mu_H(c3); \end{aligned} \quad (2.57)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(C) = & \mu_C(c1) \wedge \mu_C(c2) \wedge \mu_C(c3) \vee \mu_C(c1) \wedge \mu_C(c2) \wedge \mu_H(c3) \vee \\ & \mu_H(c1) \wedge \mu_C(c2) \wedge \mu_C(c3); \end{aligned} \quad (2.58)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(C) = & \mu_B(c1) \wedge \mu_B(c2) \wedge \mu_B(c3) \vee \mu_C(c1) \wedge \mu_B(c2) \wedge \mu_B(c3) \vee \\ & \mu_B(c1) \wedge \mu_B(c2) \wedge \mu_C(c3). \end{aligned} \quad (2.59)$$

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язують вартість впровадження (с1), з витратами на утеплювальні матеріали (с11), витратами на монтаж (с12), вартістю експлуатації конструкції (с13):

$T(c11) = \langle \text{низькі, середні, високі} \rangle;$

$T(c12) = \langle \text{низькі, середні, високі} \rangle;$

$T(c13) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle.$

Нечітка матриця знань з урахуванням введених якісних членів для моделювання залежності:

$$c1 = f(c11, c12, c13), \quad (2.60)$$

наведена в таблиці Б.5

Лінгвістичні твердження, наведені в таблиці В.5, відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних для відповідного терма:

$$\begin{aligned} \mu_H(c1) = & \mu_H(c11) \wedge \mu_H(c12) \wedge \mu_H(c13) \vee \mu_H(c11) \wedge \mu_H(c12) \wedge \mu_C(c13) \vee \\ & \mu_C(c11) \wedge \mu_H(c12) \wedge \mu_H(c13); \end{aligned} \quad (2.61)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(c1) = & \mu_C(c11) \wedge \mu_C(c12) \wedge \mu_C(c13) \vee \mu_C(c11) \wedge \mu_H(c12) \wedge \mu_C(c13) \vee \\ & \mu_H(c11) \wedge \mu_C(c12) \wedge \mu_C(c13); \end{aligned} \quad (2.62)$$

$$\begin{aligned} \mu_V(c1) = & \mu_V(c11) \wedge \mu_V(c12) \wedge \mu_V(c13) \vee \mu_V(c11) \wedge \mu_C(c12) \wedge \mu_V(c13) \vee \\ & \mu_V(c11) \wedge \mu_V(c12) \wedge \mu_C(c13). \end{aligned} \quad (2.63)$$

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язують оцінку економії енергії(с2), з щорічним зменшення витрат на опалення/охолодження (с21), з енергетичним ефектом з урахуванням тарифів (с22):

$T(c21) = \langle \text{низьке, середнє, високе} \rangle;$

$T(c22) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle.$

Нечітка матриця знань з урахуванням введених якісних членів для моделювання залежності:

$$c2 = f(c21, c22), \quad (2.64)$$

наведена в таблиці Б.6

Лінгвістичні твердження, наведені в таблиці В.6, відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних для відповідного терма:

$$\mu_H(c2) = \mu_H(c21) \wedge \mu_H(c22) \vee \mu_C(c21) \wedge \mu_H(c22) \vee \mu_H(c21) \wedge \mu_C(c22); \quad (2.65)$$

$$\mu_C(c2) = \mu_C(c21) \wedge \mu_C(c22); \quad (2.66)$$

$$\mu_B(c2) = \mu_B(c21) \wedge \mu_B(c22) \vee \mu_C(c21) \wedge \mu_B(c22) \vee \mu_B(c21) \wedge \mu_C(c22); \quad (2.67)$$

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язують інвестиційну привабливість($c3$), з терміном окупності ($c31$), з індексом рентабельності ($c32$):

$$T(c31) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle;$$

$$T(c32) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle.$$

Нечітка матриця знань з урахуванням введених якісних членів для моделювання залежності:

$$c3 = f(c31, c32), \quad (2.68)$$

наведена в таблиці Б.7

Лінгвістичні твердження, наведені в таблиці В.7, відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних для відповідного терма:

$$\mu_H(c3) = \mu_B(c31) \wedge \mu_H(c32) \vee \mu_C(c31) \wedge \mu_H(c32) \vee \mu_B(c31) \wedge \mu_C(c32); \quad (2.69)$$

$$\mu_C(c3) = \mu_C(c31) \wedge \mu_C(c32); \quad (2.70)$$

$$\mu_B(c3) = \mu_H(c31) \wedge \mu_B(c32) \vee \mu_C(c31) \wedge \mu_B(c32) \vee \mu_H(c31) \wedge \mu_C(c32); \quad (2.71)$$

2.3.7 Моделювання системи прийняття рішень з урахуванням екологічних та експлуатаційних факторів

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язують екологічні та експлуатаційні фактори (D) з екологічністю матеріалів (d1), довговічністю конструкції (d2), експлуатаційними ризиками (d3) виконується за допомогою системи термінів:

$T(d1) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$

$T(d2) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$

$T(d3) = \langle \text{низькі, середні, високі} \rangle.$

Нечітка матриця знань з урахуванням введених якісних членів для моделювання залежності (2.17) наведена в Додатку В таблиці В.8.

Лінгвістичні твердження, наведені в таблиці В.8, відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних для відповідного терма:

$$\begin{aligned} \mu_H(D) &= \mu_H(d1) \wedge \mu_H(d2) \wedge \mu_H(d3) \vee \mu_H(d1) \wedge \mu_H(d2) \wedge \mu_C(d3) \vee \\ &\mu_H(d1) \wedge \mu_C(d2) \wedge \mu_H(d3); \end{aligned} \quad (2.72)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(D) &= \mu_C(d1) \wedge \mu_C(d2) \wedge \mu_C(d3) \vee \mu_C(d1) \wedge \mu_C(d2) \wedge \mu_H(d3) \vee \\ &\mu_H(d1) \wedge \mu_C(d2) \wedge \mu_C(d3); \end{aligned} \quad (2.73)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(D) &= \mu_B(d1) \wedge \mu_B(d2) \wedge \mu_B(d3) \vee \mu_C(d1) \wedge \mu_B(d2) \wedge \mu_B(d3) \vee \\ &\mu_B(d1) \wedge \mu_B(d2) \wedge \mu_C(d3). \end{aligned} \quad (2.74)$$

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язують екологічність матеріалів (d1), з рівнем викидів CO₂ при виготовленні (d11), можливістю переробки (d12), шкідливістю (d13):

$T(d11) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle;$

$T(d12) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$

$T(d13) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle.$

Нечітка матриця знань з урахуванням введених якісних членів для моделювання залежності:

$$d1 = f(d11, d12, d13), \quad (2.75)$$

наведена в таблиці Б.9

Лінгвістичні твердження, наведені в таблиці В.9, відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних для відповідного терма:

$$\begin{aligned} \mu_H(d1) = & \mu_B(d11) \wedge \mu_H(d12) \wedge \mu_B(d13) \vee \mu_B(d11) \wedge \mu_H(d12) \wedge \mu_C(d13) \vee \\ & \mu_C(d11) \wedge \mu_H(d12) \wedge \mu_B(d13); \end{aligned} \quad (2.76)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(d1) = & \mu_C(d11) \wedge \mu_C(d12) \wedge \mu_C(d13) \vee \mu_C(d11) \wedge \mu_H(d12) \wedge \mu_C(d13) \vee \\ & \mu_B(d11) \wedge \mu_C(d12) \wedge \mu_C(d13); \end{aligned} \quad (2.77)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(d1) = & \mu_H(d11) \wedge \mu_B(d12) \wedge \mu_H(d13) \vee \mu_H(d11) \wedge \mu_C(d12) \wedge \mu_H(d13) \vee \\ & \mu_H(d11) \wedge \mu_B(d12) \wedge \mu_C(d13). \end{aligned} \quad (2.78)$$

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язують довговічність конструкції (d2), з терміном ефективної експлуатації (d21), з вогнестійкістю (d22), з біостійкістю (d23):

$T(d21) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle;$

$T(d22) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$

$T(d23) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle.$

Нечітка матриця знань з урахуванням введених якісних членів для моделювання залежності:

$$d2 = f(d21, d22, d23), \quad (2.79)$$

наведена в таблиці Б.10

Лінгвістичні твердження, наведені в таблиці В.10, відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних для відповідного терма:

$$\mu_H(d2) = \mu_H(d21) \wedge \mu_H(d22) \wedge \mu_H(d23) \vee \mu_H(d21) \wedge \mu_H(d22) \wedge \mu_C(d23) \vee$$

$$\mu_C(d21) \wedge \mu_H(d22) \wedge \mu_H(d23); \quad (2.80)$$

$$\mu_C(d2) = \mu_C(d21) \wedge \mu_C(d22) \wedge \mu_C(d23) \vee \mu_C(d21) \wedge \mu_H(d22) \wedge \mu_H(d23) \vee \mu_H(d21) \wedge \mu_C(d22) \wedge \mu_C(d23); \quad (2.81)$$

$$\mu_B(d2) = \mu_B(d21) \wedge \mu_B(d22) \wedge \mu_B(d23) \vee \mu_C(d21) \wedge \mu_B(d22) \wedge \mu_B(d23) \vee \mu_B(d21) \wedge \mu_B(d22) \wedge \mu_C(d23). \quad (2.82)$$

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язують експлуатаційні ризики($d3$), з ймовірністю появи конденсату ($d31$), з ризиком пошкодження фасаду ($d32$):

$T(d31) = < \text{низька, середня, висока} >$;

$T(d32) = < \text{низький, середній, високий} >$.

Нечітка матриця знань з урахуванням введених якісних членів для моделювання залежності:

$$d3 = f(d31, d32), \quad (2.83)$$

наведена в таблиці Б.11

Лінгвістичні твердження, наведені в таблиці В.11, відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних для відповідного терма:

$$\mu_H(d3) = \mu_H(d31) \wedge \mu_H(d32) \vee \mu_C(d31) \wedge \mu_H(d32) \vee \mu_H(d31) \wedge \mu_C(d32); \quad (2.84)$$

$$\mu_C(d3) = \mu_C(d31) \wedge \mu_C(d32); \quad (2.85)$$

$$\mu_B(d3) = \mu_B(d31) \wedge \mu_B(d32) \vee \mu_C(d31) \wedge \mu_B(d32) \vee \mu_B(d31) \wedge \mu_C(d32). \quad (2.86)$$

2.4 Розроблення аналітичних моделей функцій належності для оцінювання входних змінних, які визначають процес прийняття організаційних-технічних рішень

Застосування нечітких логічних рівнянь передбачає задання функції належності $\mu_T(u)$ для всіх нечітких термів, представлених у таблиці 2.2. Функції належності (рис. 2.6- 2.10, Додаток В) не можуть бути безпосередньо використані у

випадку безперервної зміни вхідної змінної, оскільки вона може набувати не лише дискретних значень u_i , а й проміжних. Це обмеження усувається шляхом застосування лінійної інтерполяції.

За умови, що $\mu_T(u_i) = \mu_i$ та $\mu_T(u_{i+1}) = \mu_{i+1}$, значення $\mu_T(u^*)$, де $u^* \in (u_i, u_{i+1})$, визначається за відповідним співвідношенням

$$\mu_T(u^*) = \frac{u^*(\mu_{i+1} - \mu_i) + \mu_i(u_{i+1} - u_i) - u_i(\mu_{i+1} - \mu_i)}{u_{i+1} - u_i}. \quad (2.87)$$

Розгляд змінних - А, В, С, D виключно на дискретній універсальній множині не дає змоги врахувати ситуації, у яких на показник ефективності проєкту діють комбіновані чинники. Для усунення цього обмеження область визначення змінної задається у вигляді умовного інтервалу, в межах якого кожному елементу множини відповідають відповідні значення. На основі функції належності (рис. 2.6- 2.10, Додаток В) та формули (2.87), отримують аналітичні моделі функції належності оцінок вхідних змінних для всіх термів, що описуються системою рівнянь виду:

$$\mu_T(u^*) = \frac{au^* + b}{c}, \quad (2.88)$$

де $a = \mu_{i+1} - \mu_i$;

$b = \mu_i(u_{i+1} - u_i) - u_i(\mu_{i+1} - \mu_i)$;

$c = u_{i+1} - u_i$.

Параметри, що входять до системи рівнянь (2.25-2.86), що описують моделі функцій належності – організаційні фактори, технічні фактори, економічні фактори, екологічні та експлуатаційні фактори, наведено в таблицях 2.10-2.13.

Таблиця 2.10 - Параметри рівняння моделі функції належності на рівні «організаційні фактори»

Фактори впливу	$\mu_i(u^*)$	$\mu_i(u^*) = \frac{au^* + b}{c}$			$u^* \in (u_i, u_{i+1})$
		a	b	c	
1	2	3	4	5	6
рівень професійної підготовки спеціалістів	$\mu_H(a11)$	-0,44	4,44	4	1-5
		-0,44	5	5	5-10
	$\mu_C(a11)$	0,38	2,13	4	1-5
		-0,38	6,88	5	5-10
	$\mu_D(a11)$	0,5	-2,01	4	1-5
		0,38	1,25	5	5-10
досвід виконання проектів енергозбереження	$\mu_H(a12)$	-0,50	50	50	0-50
		-0,38	43,75	50	50-100
	$\mu_C(a12)$	0,29	30,50	50	0-50
		-0,29	60,29	50	50-100
	$\mu_B(a12)$	0,57	7,14	50	0-50
		0,29	21,43	50	50-100
здатність приймати управлінські рішення в умовах невизначеності	$\mu_H(a13)$	-0,44	50	50	0-50
		-0,44	50	50	50-100
	$\mu_C(a13)$	0,63	18,75	50	0-50
		-0,63	81,25	50	50-100
	$\mu_B(a13)$	0,46	5,56	50	0-50
		0,43	7,14	50	50-100
адекватність календарного плану	$\mu_H(a21)$	-0,25	50	50	0-50
		-0,63	68,75	50	50-100
	$\mu_C(a21)$	0,67	16,67	50	0-50
		-0,67	83,33	50	50-100
	$\mu_B(a21)$	0,56	5,56	50	0-50
		0,33	16,67	50	50-100
точність прогнозування тривалості робіт	$\mu_H(a22)$	-0,29	50	50	0-50
		-0,57	64,29	50	50-100
	$\mu_C(a22)$	0,4	30	50	0-50
		-0,4	70	50	50-100
	$\mu_B(a22)$	0,38	6,25	50	0-50
		0,5	0	50	50-100

Продовження таблиці 2.10

Фактори впливу	$\mu_t(u^*)$	$\mu_t(u^*) = \frac{au^* + b}{c}$			$u^* \in (u_i, u_{i+1})$
		a	b	c	
ступінь ризику невиконання графіка	$\mu_H(a23)$	-0,7	50	50	0-50
		-0,19	24,07	50	50-100
	$\mu_C(a23)$	0,57 -0,57	21,43 78,57	50 50	0-50 50-100
швидкість обміну інформацією	$\mu_H(a31)$	0,17	6,25	50	0-50
		0,71	-20,83	50	50-100
	$\mu_C(a31)$	0,55 -0,33	4,56 3,89	4 5	1-5 5-10
узгодженість між учасниками проєкту	$\mu_H(a32)$	0,43 -0,43	10,86 -7,13	4 5	1-5 5-10
		0,55 0,33	-2,3 1,64	4 5	1-5 5-10
	$\mu_C(a32)$	0,44 -0,44	1,78 7,22	4 5	1-5 5-10
доступність інформації щодо технічних змін	$\mu_{HV}(a33)$	0,52 0,38	-2,15 1,25	4 5	1-5 5-10
		-0,5 -0,33	4,5 4,17	4 5	1-5 5-10
	$\mu_{VC}(a33)$	0,75 -0,75	0,25 8,75	4 5	1-5 5-10
рівень ідентифікації ризиків	$\mu_H(a41)$	0,5 0,38	-2,01 1,25	4 5	1-5 5-10
		-0,61 -0,28	50 33,33	50 50	0-50 50-100
	$\mu_C(a41)$	0,57 -0,57	21,43 78,57	50 50	0-50 50-100
ступінь ризику невиконання графіка	$\mu_H(a41)$	0,25 0,63	6,25 -12,5	50 50	0-50 50-100
		0,57 -0,57	21,43 78,57	50 50	0-50 50-100
	$\mu_C(a41)$	0,25 0,63	6,25 -12,5	50 50	0-50 50-100

Продовження таблиці 2.10

Фактори впливу	$\mu_t(u^*)$	$\mu_t(u^*) = \frac{au^* + b}{c}$			$u^* \in (u_i, u_{i+1})$
		a	b	c	
Оперативність реагування	$\mu_H(a42)$	-0,44	4,44	4	1-5
		-0,44	5	5	5-10
	$\mu_C(a42)$	0,78	0,11	4	1-5
		-0,78	8,89	5	5-10
	$\mu_B(a42)$	0,51	-2,08	4	1-5
		0,38	1,25	5	5-10
вміння застосовувати превентивні заходи	$\mu_H(a43)$	-0,7	4,7	4	1-5
		-0,18	2,43	5	5-10
	$\mu_C(a43)$	0,75	0,250	4	1-5
		-0,75	8,738	5	5-10
	$\mu_B(a43)$	0,4	-1,48	4	1-5
		0,54	0	5	5-10

Таблиця 2.11 - Параметри рівняння моделі функції належності на рівні «технічні фактори»

Фактори впливу	$\mu_t(u^*)$	$\mu_t(u^*) = \frac{au^* + b}{c}$			$u^* \in (u_i, u_{i+1})$
		a	b	c	
1	2	3	4	5	6
приведений опір теплопередачі	$\mu_H(b11)$	-0,44	2,94	2,5	1-3,5
		-0,44	3,5	3,5	3,5-7
	$\mu_C(b11)$	0,38	1,19	2,5	1-3,5
		-0,38	4,81	3,5	3,5-7
	$\mu_B(b11)$	0,5	-1,44	2,5	1-3,5
		0,38	0,88	3,5	3,5-7
теплопровідність матеріалів	$\mu_H(b12)$	-0,50	0,84	-0,82	0,03-0,85
		-0,39	0,76	-0,85	0,85-1,7
	$\mu_C(b12)$	0,41	0,450	-0,82	0,03-0,85
		-0,41	-0,28	-0,85	0,85-1,7
	$\mu_B(b12)$	0,47	-0,28	-0,82	0,03-0,85
		0,38	0,21	-0,85	0,85-1,7

Продовження таблиці 2.11

Фактори впливу	$\mu_t(u^*)$	$\mu_t(u^*) = \frac{au^* + b}{c}$			$u^* \in (u_i, u_{i+1})$
		a	b	c	
коефіцієнт паропроникності	$\mu_H(b13)$	-0,61	0,15	0,14	0,01-0,15
		-0,28	0,1	0,16	0,15-0,31
	$\mu_C(b13)$	0,67	0,04	0,14	0,01-0,15
		-0,67	0,26	0,16	0,15-0,31
	$\mu_B(b13)$	0,25	-0,02	0,14	0,01-0,15
		0,63	-0,03	0,16	0,15-0,31
густина утеплювача	$\mu_H(b14)$	-0,33	104,67	102	8-110
		-0,56	134,44	110	110-220
	$\mu_C(b14)$	0,17	83,67	102	8-110
		-0,17	128,33	110	110-220
	$\mu_B(b14)$	0,57	-48,29	102	8-110
		0,29	47,14	110	110-220
вологість утеплювача	$\mu_H(b15)$	-0,36	4,81	4,7	0,3-5
		-0,5	5,71	5	5-10
	$\mu_C(b15)$	0,44	2,48	4,7	0,3-5
		-0,44	7,22	5	5-10
	$\mu_B(b15)$	0,31	-0,98	4,7	0,3-5
		0,56	-0,63	5	5-10
трудомісткість	$\mu_H(b21)$	-0,36	3,51	3,5	0,5-4
		-0,48	4,29	4	4-8
	$\mu_C(b21)$	0,5	1,5	3,5	0,5-4
		-0,5	6	4	4-8
	$\mu_B(b21)$	0,38	-1,06	3,5	0,5-4
		0,5	0	4	4-8
ремонт-придатність	$\mu_H(b22)$	-0,61	0,53	0,5	0-0,5
		-0,3	0,38	0,5	0,5-1
	$\mu_C(b22)$	0,6	0,2	0,5	0-0,5
		-0,6	0,8	0,5	0,5-1
	$\mu_B(b22)$	0,44	-0,16	0,5	0-0,5
		0,44	0,06	0,5	0,5-1

Таблиця 2.12 - Параметри рівняння моделі функції належності на рівні «економічні фактори»

Фактори впливу	$\mu_i(u^*)$	$\mu_i(u^*) = \frac{au^* + b}{c}$			$u^* \in (u_i, u_{i+1})$
		a	b	c	
1	2	3	4	5	6
витрати на утеплювальні матеріали	$\mu_H(c11)$	-0,4	460,42	400	150-550
		-0,48	531,53	450	550-1000
	$\mu_C(c11)$	0,71	7,14	400	150-550
		-0,71	842,86	450	550-1000
	$\mu_B(c11)$	0,44	-190,63	400	150-550
		0,44	12,5	450	550-1000
витрати на монтаж	$\mu_H(c12)$	-0,50	1300	1200	200-1400
		-0,39	1094	1100	1400-2500
	$\mu_C(c12)$	0,7	224,50	1200	200-1400
		-0,7	2005,86	1100	1400-2500
	$\mu_B(c12)$	0,39	-408,62	1200	200-1400
		0,5	-150	1100	1400-2500
вартість експлуатації конструкції	$\mu_H(c13)$	-0,56	37,78	35	5-40
		-0,22	26,67	40	40-80
	$\mu_C(c13)$	0,47	16,05	35	5-40
		-0,47	58,95	40	40-80
	$\mu_B(c13)$	0,21	-3,57	35	5-40
		0,64	-11,43	40	40-80
щорічне зменшення витрат на опалення/охолодження	$\mu_H(c21)$	-0,5	55	50	10-60
		-0,33	50	60	60-120
	$\mu_C(c21)$	0,55	17,27	50	10-60
		-0,55	92,73	60	60-120
	$\mu_B(c21)$	0,38	-16,25	50	10-60
		0,5	0	60	60-120
енергетичний ефект з урахуванням тарифів	$\mu_H(c22)$	-0,42	941,67	900	100-1000
		-0,42	1000	1000	1000-2000
	$\mu_C(c22)$	0,64	257,14	900	100-1000
		-0,64	1642,86	1000	1000-2000
	$\mu_B(c22)$	0,36	-228,57	900	100-1000
		0,5	0	1000	1000-2000

Продовження таблиці 2.12

Фактори впливу	$\mu_t(u^*)$	$\mu_t(u^*) = \frac{au^* + b}{c}$			$u^* \in (u_i, u_{i+1})$
		a	b	c	
термін окупності	$\mu_H(c31)$	-0,5	11,5	11	1-12
		-0,39	11,17	13	12-25
	$\mu_C(c31)$	0,75	2	11	1-12
		-0,75	22	13	12-25
	$\mu_B(c31)$	0,33	-2,78	11	1-12
		0,56	-0,89	13	12-25
індекс рентабельності	$\mu_H(c32)$	-0,25	4,25	4	1-5
		-0,63	6,88	5	5-10
	$\mu_C(c32)$	0,67	0,67	4	1-5
		-0,67	8,33	5	5-10
	$\mu_B(c32)$	0,5	-2	4	1-5
		0,38	1,25	5	5-10

Таблиця 2.13 - Параметри рівняння моделі функції належності на рівні «екологічні та експлуатаційні фактори»

Фактори впливу	$\mu_t(u^*)$	$\mu_t(u^*) = \frac{au^* + b}{c}$			$u^* \in (u_i, u_{i+1})$
		a	b	c	
1	2	3	4	5	6
рівень викидів CO ₂ при виготовленні	$\mu_H(d11)$	-0,33	143,33	140	10-150
		-0,56	183,33	150	150-300
	$\mu_C(d11)$	0,8	20	140	10-150
		-0,8	270	150	150-300
	$\mu_B(d11)$	0,5	-57,13	140	10-150
		0,38	37,5	150	150-300
можливість переробки	$\mu_H(d12)$	-0,38	50	50	0-50
		-0,5	56,25	50	50-100
	$\mu_C(d12)$	0,67	16,67	50	0-50
		-0,67	83,33	50	50-100
	$\mu_B(d12)$	0,3	-12,5	50	0-50
		0,5	0	50	50-100

Продовження таблиці 2.13

Фактори впливу	$\mu_t(u^*)$	$\mu_t(u^*) = \frac{au^* + b}{c}$			$u^* \in (u_i, u_{i+1})$
		a	b	c	
шкідливість	$\mu_H(d13)$	-0,5	4,50	4	1-5
		-0,38	4,38	5	5-10
	$\mu_C(d13)$	0,43	1,86	4	1-5
		-0,43	7,14	5	5-10
	$\mu_B(d13)$	0,47	-1,87	4	1-5
		0,47	0,58	5	5-10
термін ефективної експлуатації	$\mu_H(d21)$	-0,44	21,67	15	15-30
		-0,44	24,44	20	30-50
	$\mu_C(d21)$	0,8	-0,50	15	15-30
		-0,8	-0,38	20	30-50
	$\mu_B(d21)$	0,56	-15	15	15-30
		0,33	3,33	20	30-50
вогне-стійкість	$\mu_H(d22)$	-0,56	4,56	4	1-5
		-0,33	3,89	5	5-10
	$\mu_C(d22)$	0,43	1,86	4	1-5
		-0,43	7,14	5	5-10
	$\mu_B(d22)$	0,55	-2,3	4	1-5
		0,33	1,64	5	5-10
біостійкість	$\mu_H(d23)$	-0,56	2,5	2,5	0-2,5
		-0,33	1,94	2,5	2,5-5
	$\mu_C(d23)$	0,71	0,71	2,5	0-2,5
		-0,71	4,29	2,5	2,5-5
	$\mu_B(d23)$	0,5	-0,94	2,5	0-2,5
		0,38	0,63	2,5	2,5-5
ймовірність появи конденсату	$\mu_H(d31)$	-0,44	40	40	0-40
		-0,44	40	40	40-80
	$\mu_C(d31)$	0,63	15	40	0-40
		-0,63	65	40	40-80
	$\mu_B(d31)$	0,46	-13,97	40	0-40
		0,43	5,71	40	40-80

Продовження таблиці 2.13

Фактори впливу	$\mu_i(u^*)$	$\mu_i(u^*) = \frac{au^* + b}{c}$			$u^* \in (u_i, u_{i+1})$
		a	b	c	
ризик пошкоджень фасаду	$\mu_H(d32)$	-0,5	20	20	0-20
		-0,33	16,67	20	20-40
	$\mu_C(d32)$	0,78	4,44	20	0-20
		-0,78	35,56	20	20-40
	$\mu_B(d32)$	-0,46	-6,98	20	0-20
		-0,43	2,86	20	20-40

2.5 Дефазифікація та перевірка достовірності результатів моделювання

Застосування методів нечіткого логічного висновку до інформації, отриманої на попередніх етапах дослідження, дає змогу визначати прогнозований показник у вигляді нечітких множин. Такі множини характеризують оцінку енергозбереження ОТР для фіксованого вектора чинників впливу. Для переходу від нечітких результатів до кількісного значення здійснюється процедура дефазифікації - перетворення нечіткої інформації у чітку форму.

Серед відомих методів дефазифікації найбільш уживаним є метод визначення «центра ваги» плоскої фігури, обмеженої функцією належності нечіткої множини та віссю абсцис. Поєднання моделі нечіткого логічного висновку з процедурою дефазифікації забезпечує можливість аналізу змін вихідного параметра – ймовірності енергозбереження - залежно від варіації факторів впливу.

Дефазифікація нечітких множин за принципом «центра ваги» дозволяє отримати кількісну оцінку ймовірності енергозбереження за заданих значень чинників впливу [103]:

$$N = (A, B, C, D) = \frac{\sum_{i=1}^l N_i^{d_i} \cdot \mu_{d_i}(N)}{\sum_{i=1}^l \mu_{d_i}(N)}, \quad (3.29)$$

де l – кількість нечітких термів для оцінки змінної N ;

d_i – назва i -го терму, $a = \overline{1, l}$;

$\mu_{d_i}(N)$ – ступінь належності N до терма d_i .

Розглядався проєкт з вихідними даними, наведеними в таблиці (2.14).

Таблиця 2.14 - Функції належності факторів та їх значення, що впливають на величину ймовірності енегоефективності

Фактор (U*)	Значення	Значення функції належності термів для оцінки фактора U*		Значення функції належності змінної (A, B, C, D)
1	2	3		4
a11	6 балів	$\mu_H(a11)=0,47$ $\mu_C(a11)=0,93$ $\mu_D(a11)=0,7$	$\mu_H(a1)=0,47$ $\mu_C(a1)=0,93$ $\mu_B(a1)=0,83$	$\mu_H(A)=0,47$ $\mu_C(A)=0,75$ $\mu_B(A)=0,86$
a12	70%	$\mu_H(a12)=0,35$ $\mu_C(a12)=0,89$ $\mu_B(a12)=0,83$		
a13	65%	$\mu_H(a13)=0,42$ $\mu_C(a13)=0,81$ $\mu_B(a13)=0,7$		
a21	50%	$\mu_H(a21)=0,75$ $\mu_C(a21)=1$ $\mu_B(a21)=0,67$	$\mu_H(a2)=0,75$ $\mu_C(a2)=1$ $\mu_B(a2)=0,76$	
a22	80%	$\mu_H(a22)=0,37$ $\mu_C(a22)=0,76$ $\mu_B(a22)=0,8$		
a23	10%	$\mu_H(a23)=0,86$ $\mu_C(a23)=0,54$ $\mu_B(a23)=0,16$		
a31	6	$\mu_H(a13)=0,38$ $\mu_C(a13)=0,91$ $\mu_B(a13)=0,72$	$\mu_H(a3)=0,42$ $\mu_C(a3)=0,91$ $\mu_B(a3)=0,72$	

Продовження таблиці 2.14

1	2	3		4
a32	6	$\mu_H(a13)=0,47$ $\mu_C(a13)=0,91$ $\mu_B(a13)=0,7$	$\mu_H(a4)=0,42$ $\mu_C(a4)=0,69$ $\mu_B(a4)=0,86$	
a33	6	$\mu_H(a13)=0,43$ $\mu_C(a13)=0,85$ $\mu_B(a13)=0,7$		
a41	55%	$\mu_H(a13)=0,36$ $\mu_C(a13)=0,94$ $\mu_B(a13)=0,44$		
a42	7	$\mu_H(a13)=0,38$ $\mu_C(a13)=0,69$ $\mu_B(a13)=0,78$		
a43	8	$\mu_H(a13)=0,19$ $\mu_C(a13)=0,55$ $\mu_B(a13)=0,86$		
b11	3,4	$\mu_H(b11)=0,57$ $\mu_C(b11)=0,99$ $\mu_B(b11)=0,11$	$\mu_H(b1)=0,83$ $\mu_C(b1)=0,59$ $\mu_B(b1)=0,59$	$\mu_H(B) = 0,59$ $\mu_C(B) = 0,59$ $\mu_B(B) = 0,65$
b12	0,038	$\mu_H(b12)=0,99$ $\mu_C(b12)=0,59$ $\mu_B(b12)=-0,32$		
b13	0,05	$\mu_H(b13)=0,83$ $\mu_C(b13)=0,52$ $\mu_B(b13)=-0,05$		
b14	15	$\mu_H(b14)=0,97$ $\mu_C(b14)=0,84$ $\mu_B(b14)=-0,39$		
b15	0,5	$\mu_H(b15)=0,98$ $\mu_C(b15)=0,57$ $\mu_B(b15)=-0,17$		

Продовження таблиці 2.14

1	2	3		4
b21	4,19	$\mu_H(b21)=0,57$ $\mu_C(b21)=0,98$ $\mu_B(b21)=0,52$	$\mu_H(b2)=0,52$ $\mu_C(b2)=0,98$ $\mu_B(b2)=0,65$	$\mu_H(C)=0,92$ $\mu_C(C)=0,78$ $\mu_B(C)=0,59$
b22	0,6	$\mu_H(b22)=0,39$ $\mu_C(b22)=0,88$ $\mu_B(b22)=0,65$		
c11	200	$\mu_H(c11)=0,94$ $\mu_C(c11)=0,38$ $\mu_B(c11)=-0,26$	$\mu_H(c1)=0,92$ $\mu_C(c1)=0,59$ $\mu_B(c1)=0,06$	
c12	1250	$\mu_H(c12)=0,56$ $\mu_C(c12)=0,91$ $\mu_B(c12)=0,06$		
c13	10	$\mu_H(c13)=0,92$ $\mu_C(c13)=0,59$ $\mu_B(c13)=-0,04$		
c21	40	$\mu_H(c21)=0,7$ $\mu_C(c21)=0,78$ $\mu_B(c21)=-0,03$	$\mu_H(c2)=0,39$ $\mu_C(c2)=0,78$ $\mu_B(c2)=-0,03$	
c22	150	$\mu_H(c22)=0,97$ $\mu_C(c22)=0,39$ $\mu_B(c22)=-0,19$		
c31	3	$\mu_H(c31)=0,91$ $\mu_C(c31)=0,39$ $\mu_B(c31)=-0,16$	$\mu_H(c3)=0,5$ $\mu_C(c3)=0,73$ $\mu_B(c3)=0,78$	
c32	7	$\mu_H(c32)=0,5$ $\mu_C(c32)=0,73$ $\mu_B(c32)=0,78$		
d11	55	$\mu_H(d11)=0,89$ $\mu_C(d11)=0,46$ $\mu_B(d11)=-0,21$		

Продовження таблиці 2.14

1	2	3		4
d12	30	$\mu_H(d12)=0,78$ $\mu_C(d12)=0,73$ $\mu_B(d12)=-0,03$	$\mu_H(d1)=0,78$ $\mu_C(d1)=0,73$ $\mu_B(d)=0,89$	$\mu_H(D)=0,86$ $\mu_C(D)=0,86$ $\mu_B(D)=0,73$
d13	2	$\mu_H(d13)=0,88$ $\mu_C(d13)=0,68$ $\mu_B(d13)=-0,23$		
d21	40	$\mu_H(d21)=0,33$ $\mu_C(d21)=0,6$ $\mu_B(d21)=0,83$	$\mu_H(d2)=0,86$ $\mu_C(d2)=0,86$ $\mu_B(22)=0,7$	
d22	ГЧ	$\mu_H(d22)=0,86$ $\mu_C(d22)=0,68$ $\mu_B(d22)=-0,3$		
d23	3	$\mu_H(d23)=0,38$ $\mu_C(d23)=0,86$ $\mu_B(d23)=0,7$		
d31	10	$\mu_H(d31)=0,89$ $\mu_C(d31)=0,53$ $\mu_B(d31)=-0,23$	$\mu_H(d3)=0,75$ $\mu_C(d3)=0,61$ $\mu_B(d3)=-0,12$	
d32	10	$\mu_H(d32)=0,75$ $\mu_C(d32)=0,61$ $\mu_B(d32)=-0,12$		

Використовуючи аналітичні формули (2.25) - (2.27) та значення функцій належності і змінних А, В, С, D (табл. 2.14) отримані значення функцій належності терм-оцінок змінної N:

$$\mu_H(N) = 0,47 \cdot 0,59 \cdot 0,92 \cdot 0,86 \vee 0,47 \cdot 0,59 \cdot 0,92 \cdot 0,86 \vee 0,47 \cdot 0,59 \cdot 0,78 \cdot 0,86 = 0,86;$$

$$\mu_C(N) = 0,75 \cdot 0,59 \cdot 0,78 \cdot 0,73 \vee 0,75 \cdot 0,59 \cdot 0,92 \cdot 0,86 \vee 0,75 \cdot 0,59 \cdot 0,92 \cdot 0,86 = 0,78;$$

$$\mu_B(N) = 0,75 \cdot 0,65 \cdot 0,59 \cdot 0,73 \vee 0,86 \cdot 0,65 \cdot 0,78 \cdot 0,73 \vee 0,86 \cdot 0,65 \cdot 0,59 \cdot 0,86 = 0,75.$$

за умови, що $\underline{N} = 25\%$, $\overline{N} = 100\%$, дефазифікація згідно з формулою (3.29) дає наступний прогноз ефективності проекту :

$$N = \frac{0,86 \cdot 25 + 0,78 \cdot 75 + 0,75 \cdot 100}{0,86 + 0,78 + 0,75} = 77,53\%.$$

Визначене за результатами чисельного експерименту значення ефективності управління проєктом становить 77,53 %. Це підтверджує адекватність розробленої моделі, оскільки відносна похибка порівняно з фактичними показниками реалізованого проєкту не перевищує 10 % .(рис.2.11)

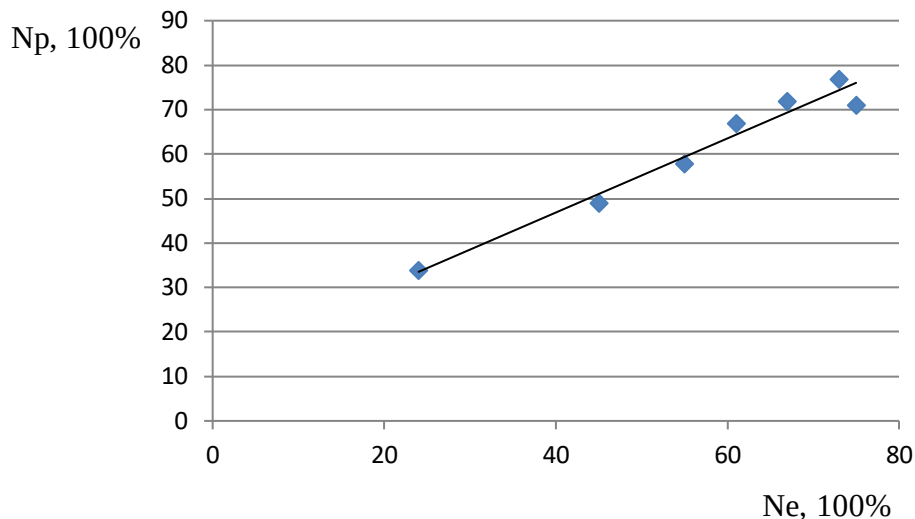


Рисунок 2.11 –Результати порівняння експериментальних та розрахункових значень

Висновки до розділу 2

Запропонований інструментарій експертної оцінки енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель нечіткими множинами та лінгвістичними змінними, який на відміну від існуючих моделей, дозволяє враховувати інтегрально вплив кількісних та якісних параметрів на прогнозовану величину сумарних енерговитрат теплоізоляційної оболонки, що повинна забезпечувати оптимальний мікроклімат приміщень. Отримані результати у вигляді нечітких логічних рівнянь дозволяють характеризувати поверхню належності лінгвістичних змінних, що описує відповідні параметри впливу як витрати енергії на капітальне будівництво, експлуатацію та рециклінг матеріалів на цільову функцію, за яку прийнято прогнозовані сумарні витрати на підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель.

Розроблено структуру узагальненої математичної моделі управління будівельними проєктами, яка представлена у вигляді логічного дерева висновків. Фактори, що впливають на значення ефективності управління проєктами, класифікуються залежно від ієрархічних зв'язків. Прогнозований показник ефективності управління проєктами та фактор впливу розглядаються як лінгвістичні змінні, описані за допомогою нечітких термінів на відповідних універсальних множинах. Функції належності нечітких оцінок впливу факторів побудовано з урахуванням ступені належності відповідних елементів до нечіткого терма. Детально розглянуто методологію побудови функцій належності для фактору – вологість. Для решти факторів наведено лише кінцеві результати у вигляді функцій належності.

Моделювання системи прийняття організаційно-технічних рішень з управління проєктами на основі нечіткої логіки було виконано з використанням експертно-лінгвістичної інформації, доступної проєктувальнику у вигляді правил «ЯКЩО-ТО», що пов'язують нечіткі терми вхідних та вихідних змінних. Лінгвістичні твердження відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних до відповідного терма. Перехід від отриманих нечітких множин до кількісної оцінки здійснюється шляхом виконання процедури дефазифікації, тобто перетворення нечіткої інформації у зрозумілу форму.

Достовірність отриманих ймовірностей енергоефективності для конкретних лінгвістичних змінних свідчить про достатньо високу практичну значимість експертно-моделюючої системи інтелектуальної підтримки управління підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій.

Результати розділу опубліковано в роботах здобувача: [30], [79], [97],[101], [102], [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116], [117], [118], [119].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВЛАШТУВАННЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ

3.1 Планування багатофакторного експерименту з дослідження впливу вологовмісту теплоізоляційного матеріалу на його теплопровідність

Енергоефективність будівель та оптимальні параметри мікроклімату приміщень визначаються параметрами та станом теплоізоляційної оболонки, при влаштуванні якої використовують будівельні матеріали з різними теплофізичними властивостями [2, 20, 82, 121]. Вибір теплоізоляційних матеріалів при влаштуванні огорожувальних конструкцій є суттєвою домінантою при проектуванні та термомодернізації будівель і потребує врахування різних чинників та державних будівельних норм [20, 47, 122, 123, 124, 125]. Теплоізоляційні матеріали огорожувальних конструкцій характеризуються різним рівнем гігроскопічності, тобто здатністю адсорбувати воду оточуючого середовища [126, 127, 127]. Підвищена гігроскопічність теплоізоляційного матеріалу є причиною збільшення його щільності як наслідок зміни його теплопровідності [128, 129]. Для захисту теплоізоляції від зовнішньої вологи влаштовують гідроізоляційний шар, який може бути ушкоджений в разі дії антропогенних факторів, особливо в умовах небезпечної ситуації під час дії уражаючих факторів в умовах воєнних дій [130, 131]. Тому питання вивчення впливу вологовмісту теплоізоляційного матеріалу на його теплопровідність є досить вагомим при проектуванні та термомодернізації огорожувальних конструкцій з врахуванням безпекової ситуації в Україні.

Для дослідження впливу вологовмісту теплоізоляційного матеріалу на його теплопровідність необхідно вирішити наступні задачі:

- за результатами аналізу попередніх досліджень обґрунтувати чинники впливу на термічний опір огорожувальних конструкцій з врахуванням вологовмісту теплоізоляційного матеріалу;
- здійснити обґрунтований вибір динаміки всіх факторів та інтервали

варіювань, що впливають на цільову функцію;

- за результатами моделювання багатофакторного експерименту отримати рівняння регресії для функції відгуку для проведення параметричної оптимізації величини термічного опору огорожувальної конструкції з врахуванням чинників теплоізоляційного матеріалу.

Між теплопровідністю теплоізоляційного матеріалу та його щільністю існує тісний прямопропорційний зв'язок, тобто із збільшенням щільності матеріалу підвищується теплопровідність виробу із нього.

Розрахунковий приріст вологи ΔW у шарі теплоізоляційного матеріалу огорожувальної конструкції, вологовміст якого збільшується, визначається за формулою [132]:

$$\Delta W = \frac{W_{\text{зп}}}{\delta_{\text{к}} \cdot \rho_{\text{к}}} 100\%, \quad (3.1)$$

де $W_{\text{зп}}$ – сумарна кількість вологи, що накопичується в шарі теплоізоляційного матеріалу, м³;

$\delta_{\text{к}}$ – товщина шару теплоізоляційного матеріалу, в якому відбувається накопичення вологи, м;

$\rho_{\text{к}}$ – густина шару теплоізоляційного матеріалу, в якому відбувається накопичення вологи, кг/м³.

Так як теплоізоляційні матеріали характеризуються гігроскопічністю, то під впливом відповідних чинників їх вологовміст підвищується, що спонукає збільшенню їхньої щільності.

Енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель відповідно до [2] характеризується приведеним термічним опором:

$$R = f(\delta_{\text{к}}, \rho_{\text{к}}, \gamma_{\text{к}}) \quad (3.2)$$

де $\gamma_{\text{к}}$ – коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу, Вт (м·К).

Для дослідження впливу означених в формулі (3.1) факторів на термічний опір огорожувальних конструкцій доцільно виконати багатофакторний експеримент методом Бокса-Уілсона [133, 134]. Далі отримані рівняння регресії для функції відгуку (формула 3.2).

Рівні варіювання факторів впливу (формула 3.2) на цільову функцію передбачено з врахуванням нормативних вимог до параметрів теплоізоляційних матеріалів, які використовуються в практиці влаштування огорожувальних конструкцій [2, 132]. При цьому передбачається, що всі фактори в межах передбачених експериментальним шляхом можуть бути реалізовані та не визивати протиріччя [135]. Для отримання поверхні відгуку для цільової функції здійснено кодування факторів впливу шляхом перетворення факторного простору за формулою[136]:

$$\gamma_j = \frac{(\bar{X}_j - \bar{X}_{jL})}{I_j}, \quad (3.3)$$

де $\bar{X}_j$, $\bar{X}_{jL}$ – відповідні рівні факторів,

I_j – інтервал варіювання факторів.

Прийнято такі значення рівнів факторів в умовному масштабі: мінімальний -1, середній 0, максимальний +1, а зіркові значення +1,681 та -1,681.

Таблиця 3.1 - Рівні факторів, інтервали варіювання

Фактори	Рівні факторів					Інтервал варіювання
	-1,681	-1,0	0	+1,0	+1,681	
X_1 – товщина шару матеріалу	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05	0,05
X_2 – густина, кг/м ³	500	400	300	200	100	100
X_3 – вологовміст приросту вологи, %	5	4	3	2	1	1
Теплопровідність, Вт/м ² К	0,12	0,10	0,08	0,06	0,04	0,02

Перевірка адекватності регресійної моделі виконується за критерієм Фішера шляхом порівняння розрахункового значення критерію з критичним [135]. Кількість дослідів для дрібнофакторного експерименту при квадратичній регресії

обчислювалося за формулою:

$$N = 2^{k-1} + 2^k + N_0, \quad (3.4)$$

де k – кількість дослідів,

2 – кількість рівнів,

N_0 – кількість дослідів в центрі плану.

Для планування експерименту відповідно до залежності (ф.3.2) та кількості рівнів (табл. 3.2) кількість дослідів рівна 31.

Таблиця 3.2 - Матриця планування експерименту для цільової функції–термічний опір матеріалу [136135]

№ дослідів	X1	X2	X3	X4	X1X2	X1X3	X1X4	X2X3	X2X4	X3X4	X_1^2	X_2^2	X_3^2	X_4^2	Y
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3,40
2	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	3,85
3	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	3,19
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	3,64
5	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	3,02
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	3,48
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	2,70
8	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	3,29
9	1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	2,80
10	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	3,40
11	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	3,20
12	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	2,90
13	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	2,70
14	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	3,14
15	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	2,40
16	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2,88
17	1	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	4,00
18	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	3,20
19	1	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	2,70
20	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	3,20
21	1	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	2,19
22	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	2,90
23	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2,90
24	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3,60
25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,50
26	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,40
27	1	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	3,60
28	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	3,50
29	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,30
30	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,60
31	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,70

Згідно рекомендацій [134] довірна ймовірність при нормуванні величини результуючої та випадкової похибок знаходиться в межах 0,8...0,9. Значимість коефіцієнта регресії здійснюється за t-критерієм Стюдента [135].

За результатами планування багатофакторного експерименту для функцій відгуку (ф.3.2) рівняння регресії для кодових значень факторів (табл. 3.2) має вигляд

$$R=1.7434X_1-0.1987X_2+0.1079X_3+0.1746X_4-0.0456X_1X_2+0.0372X_1X_3-0.0335X_1X_4-0.0344X_2X_3+0.0169X_2X_4-0.0309X_3X_4+1.7434X_1^2+0.0241X_2^2-0.1384X_3^2-0.2396X_4^2 \quad (3.5)$$

Причому критерій Фішера не перевищує критичне значення, що свідчить про адекватність математичної моделі. Значення коефіцієнта кореляції $R^2 = 0,9$.

Для дійсних значень факторів впливу (табл. 3.1) рівняння регресії для функцій відгуку (формула 3.2) – термічний опір огорожувальних конструкцій виглядає таким чином

$$R=1.4937+10.5821\delta +0.2254\phi +3.3718\lambda -1.7325\delta^2-0.0712\phi^2-5.4823\lambda^2 \quad (3.6)$$

На рис. 3.1-3.3 наведено поверхні відгуку залежності термічного опору огорожувальних конструкцій від факторів впливу, що характеризують параметри теплоізоляційних матеріалів

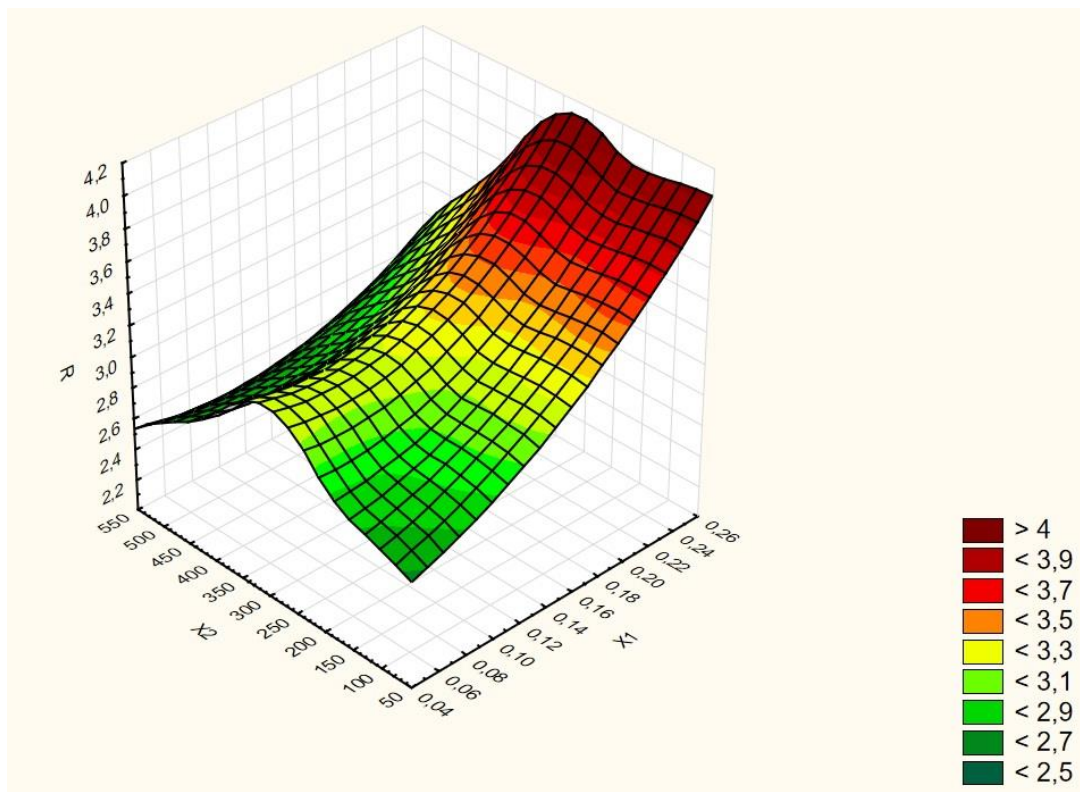


Рисунок 3.1– Поверхня відгуку залежності термічного опору від товщини матеріалу та густини матеріалу

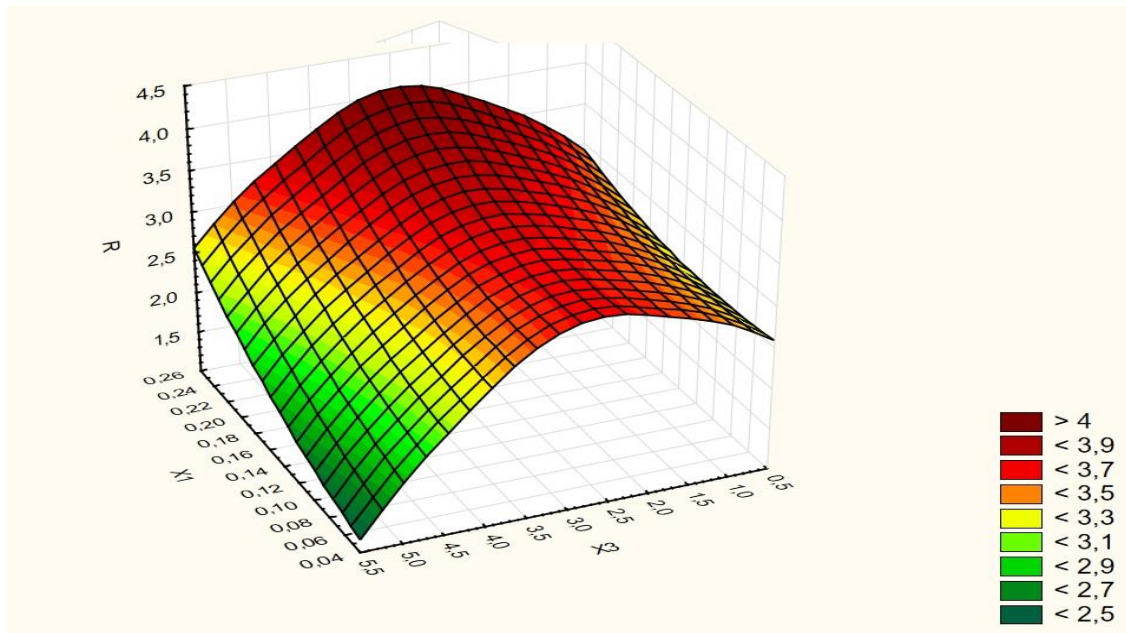


Рисунок 3.2 – Поверхня відгуку залежності термічного опору від товщини матеріалу та вологовмісту приросту вологи

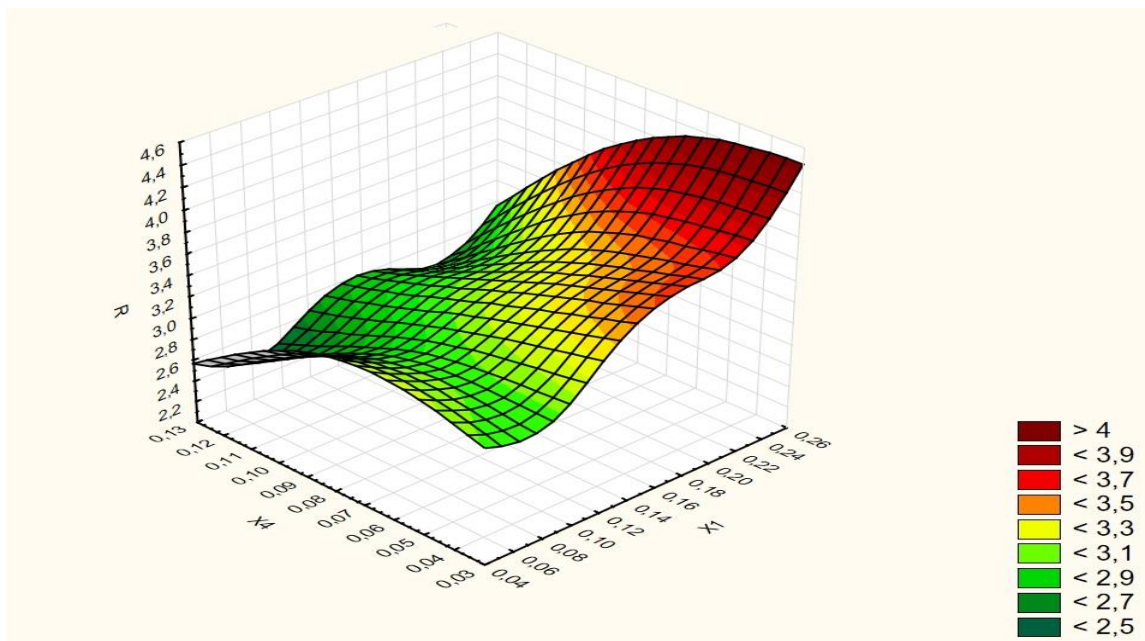


Рисунок 3.3 – Поверхня відгуку залежності термічного опору від товщини матеріалу та його коефіцієнта теплопровідності

Отримане рівняння регресії дозволяє провести параметричну оптимізацію величини термічного опору огорожувальних конструкцій з врахуванням вологовмісту, густини та товщини теплоізоляційного матеріалу (рис. 3.1-3.3).

3.2 Експериментальні дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів із мінеральної вати

Для експериментальних досліджень теплопровідності використано будівельну теплозвукоізоляцію ПРОФІТЕЛ100. Оптима (TS 040) від KNAUF INSUCATION ECOSE Technology згідно ДСТУ Б.В.2.7-562010, яка характеризується теплопровідністю $\lambda=0,039$ Вт/м К з відповідним термічним опором $R=2,55$ м²К/Вт при товщині 0,1 м [2]. Густина зразка мінеральної вати визначається об'ємно-вагомим методом, а вологість вимірюється вологоміром Moisture Meter TK100.

Відповідно до вимог ДСТУ Б.В.2.6-101-2010 [122], теплотехнічні випробування тепло- та звукоізоляційних будівельних матеріалів доцільно проводити в лабораторних умовах шляхом вимірювання температур внутрішнього та зовнішнього повітря. Досліджуваний зразок при цьому розміщують у кліматичній камері. Первинними перетворювачами поверхневої густини теплового потоку слугують термоелектричні перетворювачі, а температурні показники зразка визначають за допомогою термопар, встановлених у декількох контрольних точках.

.

Коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу визначався на основі закону Фур'є за формулою:

$$\lambda = (Q/S) \cdot (\Delta T / \Delta L), \quad (3.7)$$

де Q – кількість переданого тепла, Вт;

S – площа поперечного перерізу зразка, м²;

ΔT – зміна температури зразка матеріалу, К;

ΔL – зміна довжини зразка матеріалу, м;

Q/S – тепловий потік.

Для отримання параметрів, наведених у формулі (3.7), застосовано експериментальну установку з автоматизованою реєстрацією температурних показників за допомогою термоперетворювачів [137]. Формування однорідного теплового потоку, спрямованого на площу поперечного перерізу дослідного зразка, забезпечувалось нагрівальним елементом із можливістю плавного регулювання

температури через блок керування напругою. Контроль температури в окремих точках здійснювався багатоканальним вимірювачем Т-056МК, який працював із сенсорами DS18B20, похибка вимірювання яких становила $\pm 0,5$ °С.

Перед проведенням експериментальних досліджень теплопровідності мінераловатного утеплювача визначали фізичні характеристики зразка розміром $0,25 \times 0,25$ м і товщиною 0,1 м. За результатами вагового методу встановлено, що маса зразка становить 0,865 кг, а густина - 133 кг/м^3 . Показники вологості визначали за допомогою вологоміра. Для сухого стану матеріалу масова вологість перебуває в межах 0,5–1 %, за нормальних умов експлуатації - близько 0,5–2 %, тоді як при зволоженні цей показник може збільшуватися до 5–10 % [71].

Підготовлений зразок було встановлено у кліматичну камеру експериментальної установки для визначення теплопровідності в умовах однорідного теплового потоку (рис. 3.4) [138].

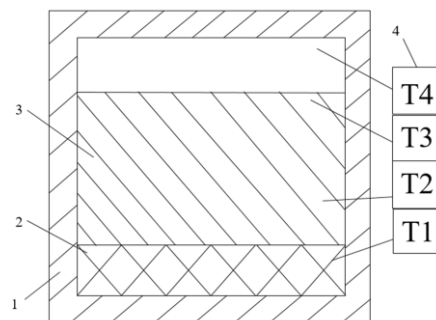


Рисунок 3.4 – Схема та фото установки для визначення теплопровідності мінеральної вати: 1 – теплоізований корпус; 2 – джерело гомогенного теплового потоку; 3 – досліджуваний зразок мінеральної вати; 4 – сенсори температури.

Температура реєструвалася в чотирьох точках (рис. 3.4) протягом 10 годин з інтервалом одна година (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 - Результати вимірювання температур в характерних точках[71]

Час, замірювання	Температура в точках вимірювань, °C			
	1	2	3	4
0	33,1	33,1	22,2	14,0
1	60,1	49,5	22,3	14,2
2	83,1	69,6	23,5	17,1
3	110,0	104,3	31,5	19,1
4	106,3	101,6	40,2	18,8
5	91,7	87,7	41,7	17,8
6	86,8	86,4	42,5	16,9
7	80,1	79,3	40,7	18,1
8	72,7	72,6	39,2	19,2
9	67,6	67,6	38,2	19,2
10	66,2	66,2	37,8	18,9

Кількість замірів зміни температурного режиму здійснювалась відповідно до методики планування експерименту з довірчою імовірністю 80 %. Графічне зображення зміни температур в різних точках замірів за допомогою відповідних сенсорів та реєструвального обладнання наведено на рис. 3.5.

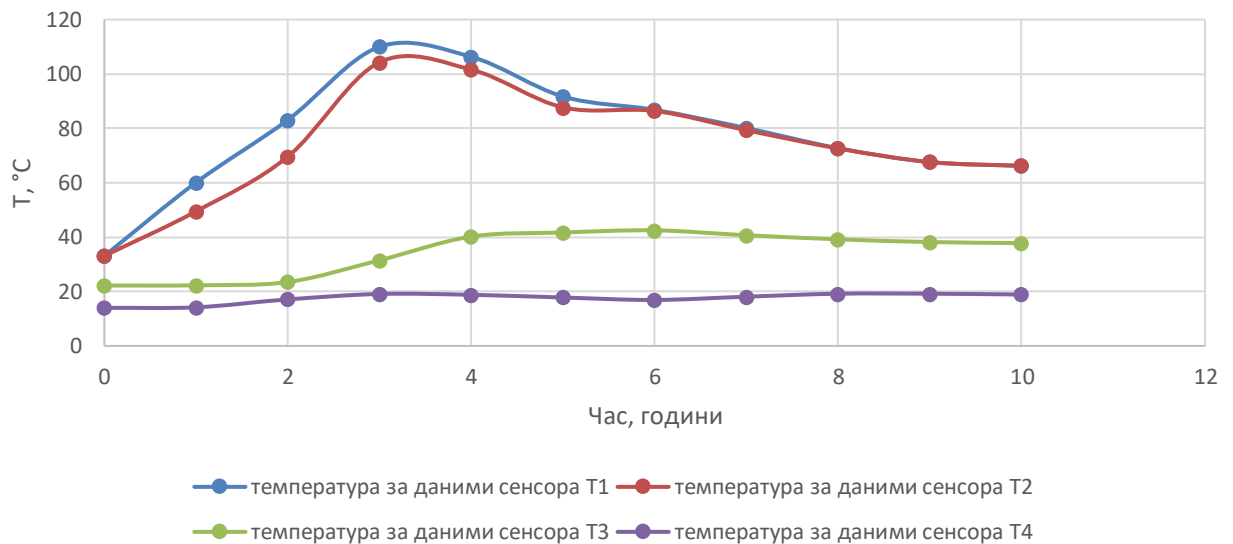


Рисунок 3.5 – Хронологічний графік зміни температур в різних точках

Отримані експериментальні значення зміни температур при гомогенному тепловому потоці (табл. 3.3 та рис. 3.4) дозволили за формулою Фур'є обчислити значення теплопровідності досліджуваного зразка мінеральної вати (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 - Результати визначення за експериментальними даними теплопровідності

Товщина зразка мінвати δ , м	Довжина випробувальної камери L, м	Ширина випробувальної камери B, м	Товщина металевих пластини δ_1 , м	Площа металевих пластини A, см ²	Коефіцієнт теплопровідності сталевих пластини $\lambda_{ст}$, Вт/м*°C	Температура гарячої сторони метал пластини T1, °C	Температура гарячої сторони металевих пластини T2, °C	Температура холодної сторони зразка соломит3, °C	Коефіцієнт теплопровідності мінвати λ , Вт/м*°C
0,1	0,25	0,25	0,012	0,0625	47	33,1	33,0988	14	0,039
0,1	0,25	0,25	0,012	0,0625	47	60,1	60,097	14,2	0,041
0,1	0,25	0,25	0,012	0,0625	47	83,1	83,095	17,1	0,047
0,1	0,25	0,25	0,012	0,0625	47	110	109,993	19,1	0,048
0,1	0,25	0,25	0,012	0,0625	47	106,3	106,294	18,8	0,043
0,1	0,25	0,25	0,012	0,0625	47	91,7	91,695	17,8	0,042
0,1	0,25	0,25	0,012	0,0625	47	86,8	86,794	16,9	0,054
0,1	0,25	0,25	0,012	0,0625	47	80,1	80,095	18,1	0,051
0,1	0,25	0,25	0,012	0,0625	47	72,7	72,697	19,2	0,035
0,1	0,25	0,25	0,012	0,0625	47	67,6	67,597	19,2	0,039
0,1	0,25	0,25	0,012	0,0625	47	66,2	66,197	18,9	0,040
Середнє значення									0,044

Середнє значення теплопровідності за результатами експерименту становить

0,044 Вт/м·К, що майже збігається з характеристикою теплопровідності мінеральної вати, яку гарантує виробник.

Висновки до розділу 3

Результати планування багатофакторного експерименту при дослідженні вологовмісту теплоізоляційного матеріалу на його теплопровідність є підґрунтям для розроблення методики проведення натурних експериментів. Отримані функції відгуку факторів впливу на цільову функцію – термічний опір огорожувальних конструкцій дозволяють оптимально обґрунтувати параметри матеріалів під час влаштування теплоізоляційної оболонки будівель та її експлуатації з врахуванням зміни вологовмісту теплоізоляційного матеріалу.

Врахування зміни вологовмісту під дією антропогенних факторів під час влаштування та термомодернізації огорожувальних конструкцій дозволить забезпечити нормативні вимоги до енергоефективності зовнішніх огорожувальних конструкцій та будівлі в цілому.

Відповідно до планування натурального експерименту в розробленій установці визначено характер розподілу температури в різних точках зразка мінеральної вати, що розміщена в кліматичній камері, до якої надходить гомогенний тепловий потік. За відомою формулою Фур'є, використовуючи експериментальні дані натурних досліджень, визначено теплопровідність мінеральної вати при відомій густині та вологості зразка. За результатами порівняльного аналізу виявлено розбіжність отриманих значень теплопровідності мінеральної вати з паспортними даними виробника.

Результати розділу опубліковано в роботах здобувача: [71], [128], [129],[136], [138].

РОЗДІЛ 4

РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЇХ ВПРОВАДЖЕННЯ ПІД ЧАС ВЛАШТУВАННЯ ТА ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЇ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ

4.1 Енергоощадні конструктивно-технічні рішення вдосконалення теплозахисту огорожувальних конструкцій будівель

Згідно із сучасними нормами теплоізоляції і енергетичної ефективності, огорожувальні конструкції повинні мати достатній опір теплопередач, що дозволяє зменшити річні енергетичні витрати будівлі на опалення та охолодження. Це можна досягнути шляхом використання багат шарових теплоізоляційних матеріалів, ефективних теплоізоляційних шарів і розробки нових конструктивних рішень для зовнішніх оболонок будівель, які забезпечують оптимальні показники термоопору при заданих кліматичних умовах[139,140]. Впровадження конструктивно-технічних рішень теплоізоляції непрозорих і світлопрозорих огорожувальних конструкцій має вирішальне значення для досягнення сучасних стандартів енергоефективності будівель. Це включає розробку нових матеріалів і технологій та оптимізацію їх розташування в будівельних профілях для забезпечення максимального опору теплопередачі при мінімальних витратах енергоресурсів.

Непрозорі огорожувальні конструкції

Одним із перспективних напрямів удосконалення теплозахисту непрозорих огорожувальних конструкцій є застосування багат шарових теплоізоляційних стінових блоків із комбінованими матеріалами та внутрішніми теплоізоляційними шарами. Така конструкція забезпечує підвищений тепловий опір за рахунок послідовного розміщення структурних шарів з низькою теплопровідністю, що створюють ефективну термоізоляційну оболонку і дозволяє зменшити теплові втрати через зовнішні стіни і знизити загальне енергоспоживання будівлі.

Запроваджені в конструкцію багат шарові рішення забезпечують не лише термічний захист, але й підтримують оптимальний волого та парообмін, що зменшує ризик утворення конденсату всередині шарів огорожувальної конструкції. Це є

важливим фактором для забезпечення довговічності та надійної експлуатації теплоізоляційних систем.

Згідно розробленого патенту на корисну модель №121651 [142] зовнішній стіновий теплозвукоізоляційний блок містить жорстку основу із з'єднувальних елементів, блок із теплоізолюючого матеріалу, який захищено шаром композитного матеріалу, який відрізняється тим, що теплозвукоізоляційний блок виготовлено із спресованої обробленої антисептиком та антипіреном соломи, яку армовано по периметру полімерною сіткою, причому зовнішню поверхню плити захищено тепловідбивною й гідроізоляційною плівкою та покрито декоративно-оздоблювальним водонепроникним шаром складного цементно-глиняно-піщаного розчину, а внутрішню поверхню оштукатурено повітропроникною глиняно-піщаною сумішшю (рис.4.1)

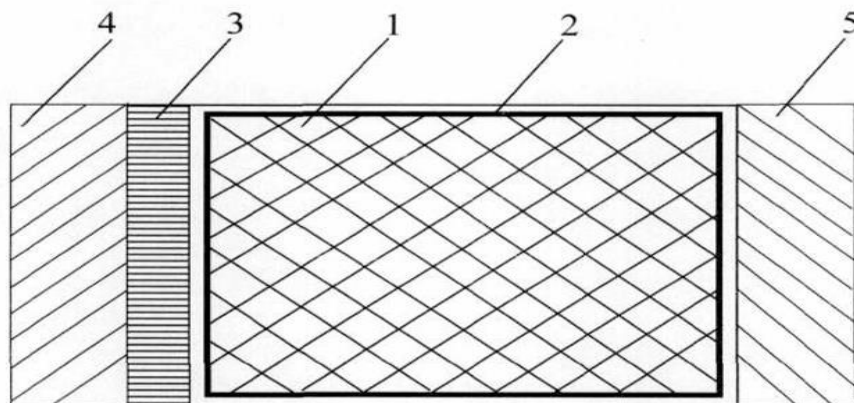


Рисунок 4.1 - Зовнішній стіновий теплозвукоізоляційний блок: 1- плита, яка виготовлена із спресованої обробленої антисептиком та антипіреном соломи; 2 - армована полімерна сітка; 3 – тепловідбивна, гідроізоляційна плівка; 4 - цементно-глиняно-піщаний розчин; 5 - повітропроникної глиняно-піщаної суміші

В патенті на корисну модель №130548 [143] багатошаровий теплоізоляційний стіновий блок, який складається із зовнішнього й внутрішнього шарів, скріплених між собою, та розміщеного між ними теплоізоляційного шару, який відрізняється тим, що зовнішній шар має вигляд кладки із модульної пустотілої керамічної цегли, а внутрішній шар виконано із гіпсокартону, прикріпленого до каркаса, утворюючи при цьому повітряний прошарок, який з'єднано із зовнішнім шаром, простір між внутрішнім та зовнішнім шарами заповнено теплоізоляційним матеріалом із обробленої антисептиком та спресованої соломи, крім того через декілька рядів

керамічної кладки по всій довжині шарів кладки та теплоізоляційного матеріалу розташована скловолокниста сітка (рис. 4.2).

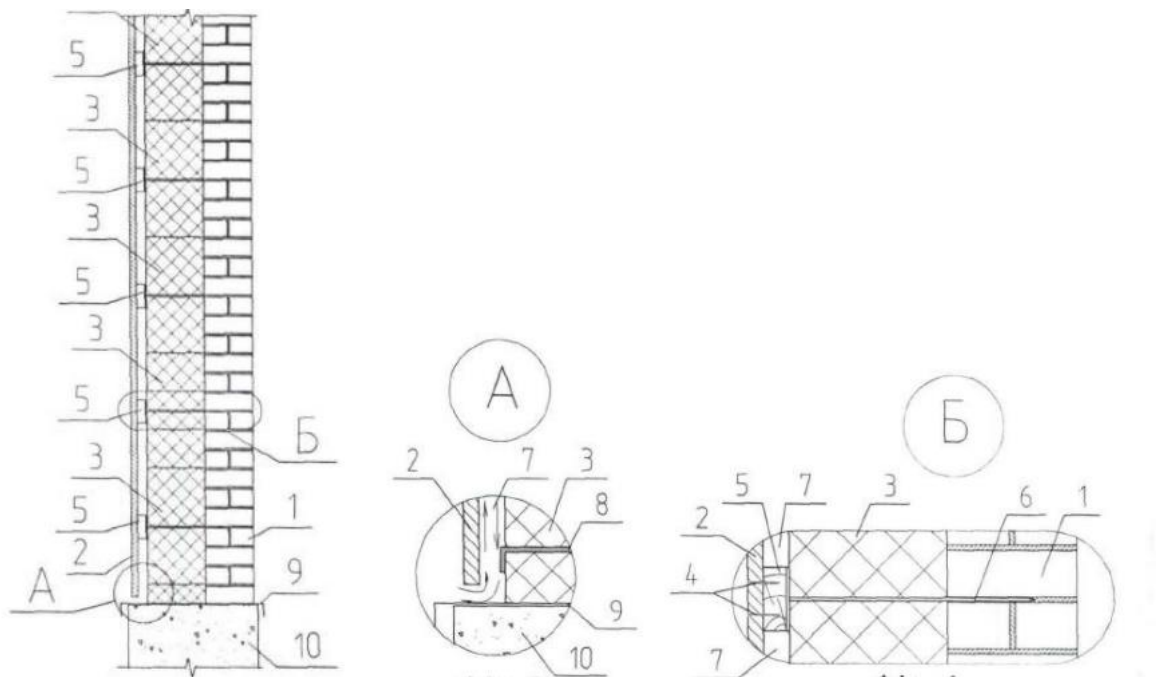


Рисунок 4.2 - Багатошаровий теплоізоляційний стіновий блок: 1- зовнішня верста, що виготовлена із модульної пустотілої керамічної цегли; 2 - внутрішня верста, яку виконано із гіпсокартону; 3 - спресовані та оброблені антисептиком солом'яні блоки; 4 - шуруп; 5 - дерев'яна бобишка; 6 - шпилька з композитного матеріалу; 7 - вентильований прошарок; 8 - скловолокниста сітка; 9 - гідроізоляція; 10 - фундамент.

Зведення енергоефективних зовнішніх та внутрішніх конструктивних елементів будівель з натуральної сировини органічного походження (патент на корисну модель № 127505 [144]) потребує вдосконалення відповідного устаткування[145]. Запропоновано установку (патент на корисну модель № 128148) для виробництва пресованих солом'яних блоків із визначеною щільністю та розмірами. Вона має просту конструкцію, а ущільнення матеріалу за допомогою привідного силового поршня здійснюється автоматично завдяки керованому зворотно-поступальному руху пресувального та виштовхувального механізмів для отримання блоків заданих параметрів [146].

Світлопрозорі огорожувальні конструкції

Світлопрозорі елементи - вікна, фасади із великою площею скління - зазвичай мають нижчий опір теплопередачі порівняно з непрозорими стінами, що створює «тонкі місця» у теплозахисній оболонці будівлі. Тому одним із основних напрямів енергоощадних рішень є удосконалення конструкцій світлопрозорих огорожень.

Інноваційні світлопрозорі системи включають використання високоефективних теплозберігаючих склопакетів, багатошарових елементів із низькоемісійними покриттями, інертними газами між шарами скла та дистанційними рамками з низькою теплопровідністю. Такі рішення дозволяють знизити коефіцієнт теплопередачі конструкцій і значно зменшити енергетичні втрати через віконні прорізи.

Патентні приклади енергоощадних світлопрозорих систем також демонструють можливості створення елементів огорожувальних конструкцій з інтегрованою теплоізоляцією, які забезпечують і природне освітлення приміщення, і мінімізацію теплових втрат. Це включає комбіновані фасадні системи з активним контролем теплообміну, що дозволяють адаптувати теплові властивості огорожень у відповідь на зміни зовнішніх умов експлуатації.

В патенті № 154989 світлопрозора огорожувальна конструкція, що містить склопакет, в якому листи скла герметично з'єднані між собою й зафіксовані один відносно одного жорстким підсилюючим профілем та дистанційною рамкою, несучі конструкції, а підсилювач дистанційної рамки фіксує світлопрозорі конструкції у будь-якому просторовому положенні за допомогою механічного кріплення, яка відрізняється тим, що введено регульовальні пристрої з теплопоглинальними та тепловідбивальними елементами, сенсори теплових потоків та блок автоматичного управління, з'єднаний з регульовальними пристроями та сенсорами теплових потоків (рис. 4.4) [147].

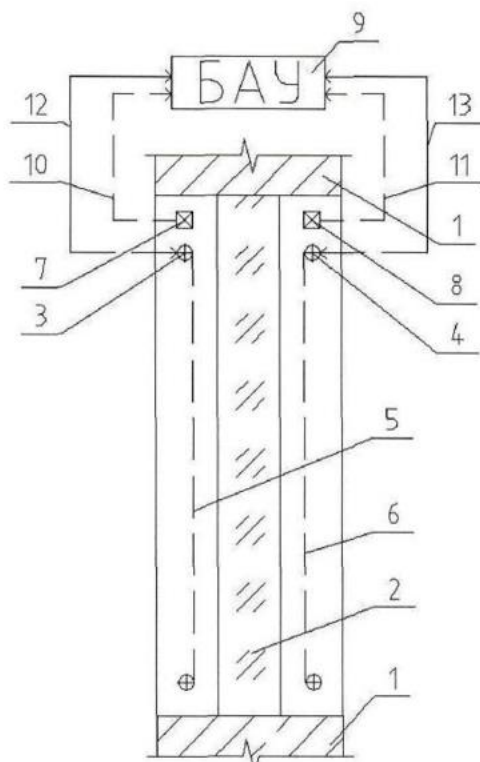


Рисунок 4.4 - Світлопрозора огорожувальна конструкція: 1 - несуча конструкція, склопакет 2, регулювальні пристрої 3 та 4 з теплопоглинальним 5 та тепловідбивним 6 елементами, сенсори зовнішнього 7 та внутрішнього 8 теплових потоків й блок автоматичного управління 9; 10, 11 - канали одностороннього зв'язку; 12 та 13- канали двостороннього зв'язку.

В основу корисної моделі №1577760 закладено створення енергоефективної світлопрозорої огорожувальної конструкції, в якій за рахунок введення нових елементів та їх розташування досягається можливість забезпечення регулювання теплових потоків як із зовнішнього навколишнього середовища, так із внутрішнього простору середовища, що приводить до підвищення енергоефективності (рис. 4.5) [148].

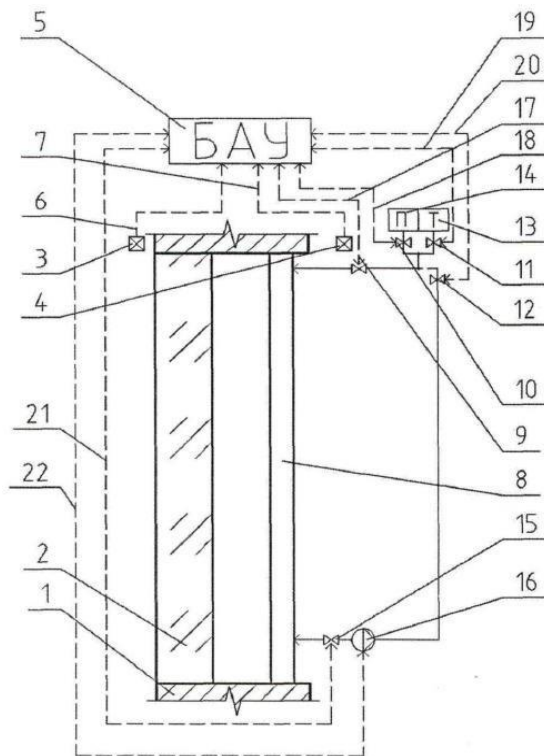


Рисунок 4.5 - Світлопрозора огорожувальна конструкція: 1 - несуча конструкція; 2 - склопакет; 3, 4 - сенсори зовнішнього та внутрішнього теплових потоків; 5 - блок автоматичного управління; 6, 7 - канали одностороннього зв'язку; 8 - акумулювальна ємність із світлопрозорого матеріалу; 9, 10, 11 та 12 - автоматизовані запірні пристрої; 13 та 14 – прозора та темна рідина; 15 - автоматизований запірний пристрій; 16 - циркуляційний насос; 17, 18, 19, 20, 21, 22 - канали двостороннього зв'язку.

4.2 Управління організаційно-технічним бізнес-процесом підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель

Управління організаційно технологічним бізнес процесом підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій є системо утворюючим елементом сучасного будівництва. Його ефективність визначається рівнем інтеграції інженерних, економічних та управлінських рішень, застосуванням інноваційних технологій і використанням методів оцінки життєвого циклу. Запропонований підхід сприяє зниженню енергоспоживання будівель, підвищення їх експлуатаційної надійності та економічної ефективності [149].

Процес підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій розглядаємо як систему взаємопов'язаних етапів за допомогою кібернетичної моделі управління проєктами (КМУП) підвищення енергоефективності (рис.4.6):

1. Аналітично-підготовчий етап – включає енергоаудит будівлі, аналіз теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій, оцінку фізичного зносу та виявлення зон підвищених тепловтрат.
2. Проєктно-інженерний етап – передбачає вибір раціональних конструктивних рішень, матеріалів і технологій утеплення з урахуванням нормативних вимог, кліматичних умов і економічної доцільності.
3. Організаційно-технічний етап – формування технологічних карт, календарних графіків, логістичних схем постачання матеріалів і організації будівельно-монтажних робіт.
4. Реалізаційний етап – виконання будівельно-монтажних робіт із дотриманням вимог якості, енергоефективності та охорони праці.
5. Контрольно-аналітичний етап – оцінка досягнутих показників енергоспоживання, аналіз фактичної ефективності впроваджених рішень, коригування експлуатаційних режимів.

Результати роботи системи можна записати у вигляді матричної системи:

$$\Pi_i = F \begin{vmatrix} N = f(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1j}) \\ T = f(x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2j}) \\ O = f(x_{31}, x_{32}, \dots, x_{3j}) \\ Z = f(x_{41}, x_{42}, \dots, x_{4j}) \\ V = f(x_{51}, x_{52}, \dots, x_{5j}) \end{vmatrix}, \quad (4.1)$$

де Π_i – приведені витрати ;

N – фактори розробленої експертно-моделюючої системи;

T - параметри системи вартості організаційно-технологічних заходів;

O - керуючі команди по оптимізації заходів;

T - рішення по технології та організації;

Z - інформація про зміну параметрів елементів системи;

V - параметри системи вартості організаційно-технологічних заходів.

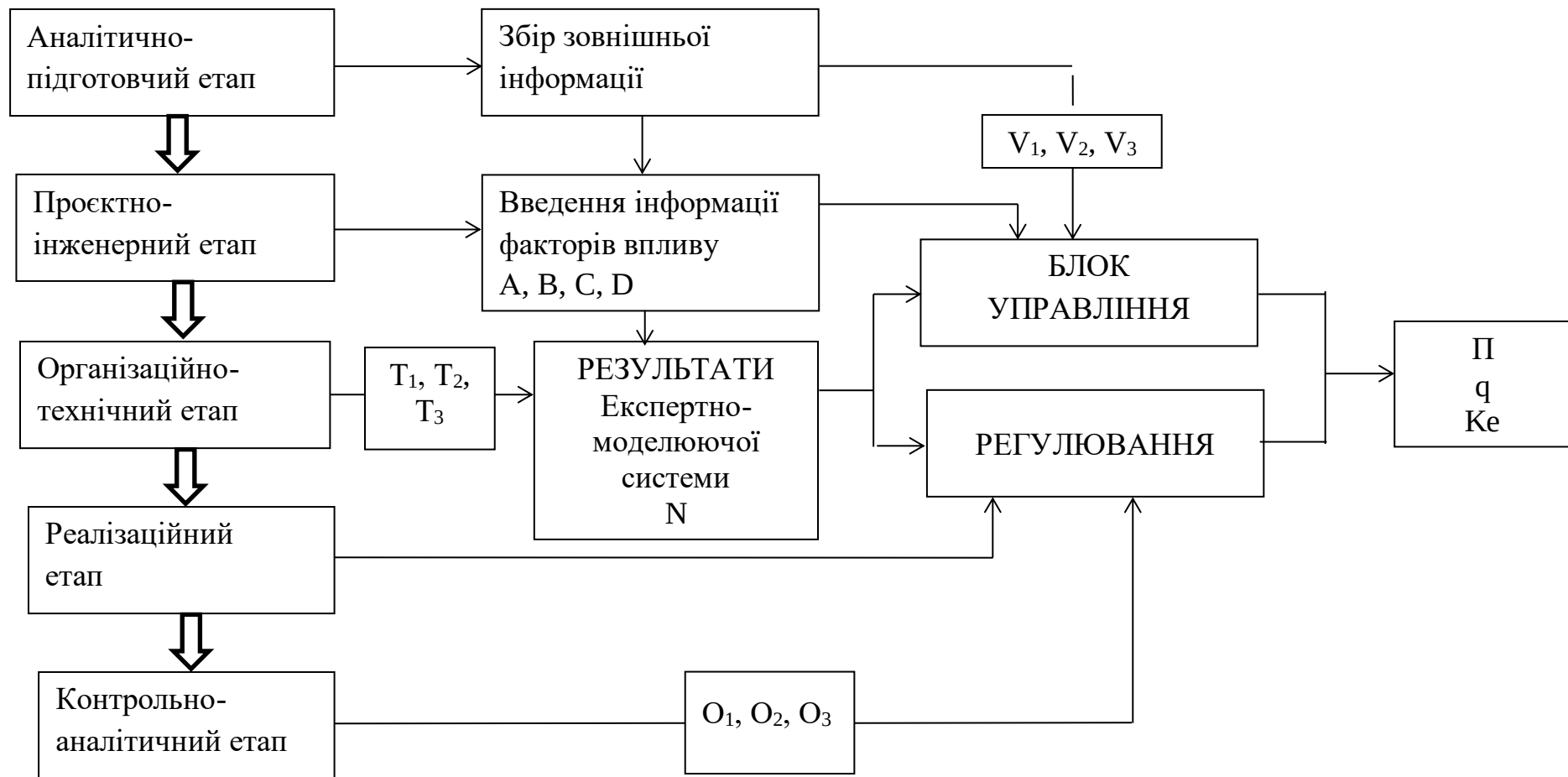


Рисунок 4.6 - Кібернетична модель управління проектами підвищення енергоефективності з урахуванням системи організаційно-технічних та економічних факторів

Для оцінки енергоефективності огорожувальних конструкцій може використовуватися:

1. Показник питомого споживання теплової енергії будинком:

$$q = \frac{Q}{A}, \quad (4.2)$$

де q – питоме споживання теплової енергії, Гкал/м²;

Q - загальне споживання теплової енергії будинком, Гкал;

A - площа огорожувальних конструкцій.

2. Коефіцієнт енергоефективності будівлі:

$$K_e = \frac{Q_{\text{до}}}{Q_{\text{після}}}, \quad (4.3)$$

де $Q_{\text{до}}$ – річні тепловтрати до модернізації, Вт;

$Q_{\text{після}}$ - тепловтрати після впровадження енергозберігаючих заходів, Вт.

3. Показник приведених витрат:

$$\Pi = C_{\text{інв}} + \sum_{t=1}^T \frac{C_{\text{експл}}}{(1+r)^t}, \quad (4.4)$$

де $C_{\text{інв}}$ - інвестиційні витрати;

$C_{\text{експл}}$ - експлуатаційні витрати у році t ;

r - ставка дисконту;

T - розрахунковий період.

Представлена на рисунку 4.6 кібернетична модель - КМУП дозволяє вибрати оптимальний варіант організаційно-технічних рішень з урахуванням їх економічних витрат.

Очікуваний ефект від впровадження організаційно-технічної моделі представлений в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Очікувані ефекти від впровадження

Показник	До впровадження	Після впровадження
Питоме енергоспоживання, кВт·год/м ²	180-220	80-120
Витрати на опалення, %	100	55-65
Термін експлуатації, років	25-30	40-50
Рівень енергоефективності	Низький	Високий

Для оцінювання економічної ефективності заходів з підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій і застосування експертно-моделюючої системи, розробленої в другому розділі, розглянуто житловий будинок (м. Вінниця, вул. Політехнічна, 9 а, в якому розташований тепловий пункт з тепловим лічильником) після виконання зовнішнього утеплення (для даного об'єкту наводилися дані в таблиці 2.14). Для отримання та обробки статистичних даних розглядалась типова 2-х кімнатна квартира площею 54 м² в цьому будинку, ціни приймалися того року, коли здійснювалась термомодернізація будинку.

Основні параметри для економічного розрахунку:

- середнє споживання теплової енергії за опалювальний період будинком після утеплення – 65 Гкал/міс;
- опалювальна площа будинку – 5130 м²;
- тариф на теплову енергію – 1341 грн/Гкал;
- вартість утеплення – 864,61 грн/м²;
- площа 2-кімнатної квартири – 54 м²;
- площа утеплення зовнішніх стін квартири – 23,5 м²;
- тривалість опалювального періоду – 6 місяців.

Питоме споживання теплової енергії будинком:

$$q = \frac{65}{5130} = 0,01267 \text{ Гкал/м}^2$$

Споживання тепла квартирою після утеплення:

$$Q_{\text{після}} = 0,01267 \times 54 = 0,684 \text{ Гкал/міс.}$$

Вартість опалення:

$$C_{\text{після,міс}} = 0,684 \times 1341 = 917 \text{ грн/міс}$$

$$C_{\text{після,рік}} = 917 \times 6 = 5502 \text{ грн/рік}$$

Оцінка споживання до утеплення:

$$Q_{\text{до}} = 0,89 \text{ Гкал/міс.}$$

Вартість опалення до утеплення:

$$C_{\text{до,міс}} = 0,89 \times 1341 = 1193,49 \text{ грн/міс}$$

$$C_{\text{до,рік}} = 1193,49 \times 6 = 7160,94 \text{ грн/рік}$$

Річна економія коштів:

$$E = C_{\text{до,рік}} - C_{\text{після,рік}} = 7160,94 - 5502 = 1658,94 \text{ грн/рік.}$$

Економія теплової енергії:

$$\Delta Q = 0,89 - 0,684 = 0,206 \text{ Гкал/міс}$$

$$\Delta Q_{\text{рік}} = 0,206 \times 6 = 1,236 \text{ Гкал/рік}$$

Вартість утеплення квартири:

$$C = 864,61 \times 23,5 = 20318 \text{ грн.}$$

Строк окупності:

$$T = \frac{C}{E} \tag{4.5}$$

$$T = 20318 / 1658,94 = 3,69 \text{ роки}$$

Коефіцієнт енергоефективності будівлі:

$$K_e = 0,89/0,684 = 1,3.$$

Зниження тепловтрат:

$$N = 1 - \frac{Q_{\text{після}}}{Q_{\text{до}}} \quad (4.6)$$

$$N = 1 - 0,684/0,89 = 23,14\%.$$

Енергоефективність:

$$N = 100 - 23,14 = 76,85 \%$$

Виконаний техніко-економічний розрахунок показав, що утеплення зовнішніх стін двох кімнатної квартири забезпечить зменшення споживання теплової енергії та витрат на опалення і підтвердив результати розрахункової енергоефективності, наведеної у другому розділі таблиці 2.14.

Виконана укрупнена класифікація організаційно-технічних рішень в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Класифікація організаційно-технічних рішень

Група рішень	Характеристика	Приклади
Організаційні	Формування структури управління та логістики	Графіки робіт, координація підрядника
Технічні	Вибір способів утеплення та монтажу	Вентильований фасад, багат шаровий теплоізоляційний стіновий блок, світлопрозора огорожувальна конструкція, термомодернізація
Економічні	Оцінка витрат і ефективності	Термін окупності, приведені витрати
Інформаційні	Управління даними та моделями	Експертно-моделююча система
Контрольні	Забезпечення якості та відповідальності	Технагляд. енергоаудит

Управління енергозберігаючими проєктами термомодернізації огорожувальних конструкцій будівель на етапі розробки інвестиційної фази проєкту для забезпечення комфортних мікрокліматичних умов в приміщеннях можливо тільки при комплексній оцінці імовірності енергоефективності з урахуванням можливих кількісних та якісних чинників. Ця задача може бути вирішена за використанням запропонованої структурно-алгоритмічної моделі реалізації проєкту комплексного управління ймовірністю енергоефективністю теплоізоляційної оболонки будівлі, яка враховує динамічне оточення проєкту, різноманітні проєктно-конструктивні, технологічно-монтажні, експлуатаційні та концептуальні рішення щодо оптимізації параметрів теплоізоляційної оболонки для створення нормативних санітарно-гігієнічних умов в приміщеннях. Для кожного блоку оцінювання теплової відмови оцінюється ризик P_i і порівнюється з ймовірністю граничного значення. Якщо ризик перевищує межу – повернення до блоку коригування параметрів, якщо ризик прийнятий – перехід до рішення щодо реалізації проєкту.

Обґрунтування доцільності оптимізації варіантів підвищення імовірності енергоефективності теплоізоляційної оболонки будівлі рекомендується здійснювати відповідно до запропонованої структурно-логічної моделі з реалізації проєкту щодо управління заходами із забезпечення теплової надійності огорожувальних конструкцій (рис. 4.7) [63].

Запропоновані та реалізовані організаційно-технічні рішення по оптимізації імовірності енергоефективності оболонки будівель на концептуальній фазі життєвого циклу проєкту управління тепловою надійністю дозволяють підвищити енергоефективність будівлі та забезпечити необхідні санітарно-гігієнічні параметри в приміщеннях.

Розроблена класифікація факторів, що впливають на прийняття організаційно-економічних рішень при виборі фінансового механізму енергозберігаючого проєкту.

Фактори впливу відповідають етапам життєвого циклу енергозберігаючого проєкту і регламентованим параметрами, зафіксованим в діючих нормативах. Розроблена класифікація факторів, що впливають на прийняття організаційно-

економічних рішень при виборі фінансового механізму енергозберігаючого проєкту, представлена на рис. 4.8[113, 114, 149, 150].



Рисунок 4.7 – Структурно-алгоритмічна модель реалізації проєкту комплексного управління ймовірністю теплової відмови та підвищення енергоефективністю теплоізоляційної оболонки будівлі



Рисунок 4.8 - Структурна схема врахування факторів впливу на прийняття організаційно-економічних рішень при виборі фінансового механізму енергозберігаючого проекту

Висновки до розділу 4

Обґрунтовано та практично підтверджено доцільність впровадження енергоощадних конструктивно-технічних рішень при влаштуванні та термомодернізації непрозорих і світлопрозорих огорожувальних конструкцій будівель. Запропоновано інноваційні енергоефективні конструктивні рішення стінових блоків, у тому числі з використанням натуральної органічної сировини. Удосконалені світлопрозорі огорожувальні конструкції з регулюванням теплових потоків дозволяють забезпечити підвищення опору теплопередачі, зменшення

тепловтрат і покращення експлуатаційної надійності теплоізоляційної оболонки будівлі. Запропоновані технічні рішення підтверджують можливість досягнення сучасних нормативних показників енергоефективності при раціональному поєднанні матеріалів, конструктивних елементів і технологій монтажу.

Розроблено та впроваджено організаційно-технічну модель управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій, яка охоплює аналітично-підготовчий, проєктно-інженерний, організаційно-технічний, реалізаційний і контрольно-аналітичний етапи. Запропонована кібернетична та структурно-алгоритмічна моделі дозволяють здійснювати вибір оптимальних рішень з урахуванням приведених витрат, показників питомих тепловтрат, коефіцієнта енергоефективності та інших параметрів життєвого циклу будівлі. Сформована класифікація організаційно-технічних рішень і факторів впливу створює методичну основу для прийняття обґрунтованих управлінських і інвестиційних рішень у сфері термомодернізації.

Техніко-економічне обґрунтування підтвердило ефективність запропонованих рішень: зниження питомого енергоспоживання та витрат на опалення і підвищення загального рівня енергоефективності будівель. Оптимізація організаційно-технічних заходів на концептуальній та інвестиційній фазах проєкту забезпечує мінімізацію сумарних витрат протягом розрахункового періоду та створення нормативних санітарно-гігієнічних умов у приміщеннях. Отримані результати свідчать про практичну значущість розроблених моделей і підтверджують доцільність їх впровадження в практику проєктування та реалізації енергозберігаючих проєктів.

Результати розділу опубліковано в роботах здобувача: [63], [113], [114], [139], [140], [141], [142], [143], [144], [145], [146], [147], [148], [149], [150].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу розроблення теоретичних положень, методичних підходів та практичних рекомендацій щодо ефективного управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель із урахуванням їх теплотехнічних, експлуатаційних та організаційно-технічних параметрів. Отримані результати підтверджують можливість комплексної оцінки та оптимізації показників енергоефективності зовнішніх огорожувальних конструкцій, що є інструментарієм зниження тепловтрат і енергоспоживання будівель. На основі поставлених завдань та отриманих наукових результатів сформульовано наступні і висновки:

1. На основі аналізу наукових досліджень вітчизняних та зарубіжних вчених в галузі управління влаштуванням та термомодернізації огорожувальних конструкцій будівель визначено ключові підходи та напрямки удосконалення організаційно-технічних рішень, реалізація яких буде сприяти підвищенню їхньої енергоефективності та зниженню енергоспоживання. Проведено порівняльний аналіз фізичних та математичних моделей організаційно-технічного забезпечення рішень з удосконалення теплоізоляційних властивостей огорожувальних конструкцій будівель. Це дозволило обґрунтувати вибір математичного апарату для моделювання управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій з урахуванням кількісних та якісних чинників впливу.
2. У результаті моніторингу сучасних концепцій експериментально-аналітичних моделей підвищення надійності теплоізоляційної оболонки будівель визначено та формалізовано сукупність факторів, що впливають на енергетичну ефективність огорожувальних конструкцій, із подальшою їх ієрархічною класифікацією. Запропоновано інструментарій експертної оцінки енергоефективності на основі теорії нечітких множин і лінгвістичних змінних, який дозволяє інтегрально враховувати кількісні та якісні параметри.

3. Розроблено структуру узагальненої математичної моделі управління у вигляді дерева логічного висновку, де фактори впливу систематизовано за ієрархічними зв'язками. Побудовано функції належності для основних параметрів, зокрема детально обґрунтовано методику їх формування для показника вологості як вагомого чинника зміни теплотехнічних характеристик.

4. На основі сформованої ієрархічної системи математичних моделей розроблено експертно-моделюючу систему інтелектуальної підтримки прийняття організаційно-технічних рішень щодо підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій. Моделювання виконано із застосуванням нечіткої логіки та бази знань у вигляді правил «ЯКЩО–ТО», що забезпечує формалізований зв'язок між вхідними та вихідними лінгвістичними змінними. Отримані нечіткі логічні рівняння та процедура дефазифікації дозволяють трансформувати експертно-лінгвістичну інформацію у кількісні показники ефективності управління. Достовірність результатів підтверджує практичну значущість запропонованої системи як інструменту обґрунтування управлінських рішень у процесах підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій, в тому числі під час термомодернізації будівель.

5. На основі багатофакторного планування експерименту отримано імітаційну кореляційно-регресійну модель з коефіцієнтом кореляції $R = 0,9$, що дозволяє здійснювати параметричну оптимізацію товщини, густини та вологовмісту теплоізоляційного матеріалу. Встановлено суттєвий вплив приросту вологи на зміну теплопровідності та, відповідно, на зниження термічного опору конструкцій. Врахування цих факторів у загальній системі управління процесами підвищення енергоефективності дозволяє приймати обґрунтовані організаційно-технічні рішення щодо вибору матеріалів та мінімізації експлуатаційних ризиків.

Проведені лабораторні дослідження теплофізичних властивостей мінеральної вати підтвердили достовірність теоретичних положень: середнє експериментальне значення коефіцієнта теплопровідності становить $0,044 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$,

6. Обґрунтовано та підтверджено ефективність впровадження енергоощадних конструктивно-технічних рішень при влаштуванні та термомодернізації огорожувальних конструкцій будівель. Доведено, що застосування інноваційних багат шарових елементів і вдосконалених світлопрозорих систем дозволить забезпечити підвищення опору теплопередачі та зниження тепловтрат. Розроблено організаційно-технічну модель управління процесами підвищення енергоефективності, яка охоплює всі етапи реалізації проєкту та дозволяє обирати оптимальні рішення з урахуванням техніко-економічних показників.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в освітньому процесі підготовки бакалаврів і магістрів у Вінницькому національному технічному університеті за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія», а також у практичну діяльність ТОВ «Подільський проєктний інститут», що підтверджено відповідними актами впровадження (Додатки Д, Е).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 № 2118-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2118-19> (Дата звернення: 23.02.2024).
2. ДБН В2.6 – 31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель.[Чинний від з 2022-09-01]. Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2021. 23 с.
3. Ратушняк Г. С., Панкевич О. Д., Панкевич В. В. Оцінювання енергоефективності світлопрозорих огорожувальних конструкцій будівель. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2022. № 2(31), С. 81–87. DOI:<https://doi.org/10.31649/2311-1429-2021-2-81-87/>
4. Європейська комісія. Європейська зелена угода. COM (2019), с. 640. Брюссель. 11.12.2019. Google Scholar.
5. Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року. Кабмін України. 29 грудня 2011 року. <https://www.epravda.com.ua/news/202/12/30/68/096>
6. Саницький М. А., Позняк О. Р., Марущак У. Д. *Енергозберігаючі технології в будівництві: навч. посібник*. Львів: Національний ун-т «Львів. Політехніка», 2013. 236 с.
7. Ратушняк Г. С., Ратушняк О. Г. *Управління проектами енергозбереження шляхом термореновації будівель: навч. посіб.* Вінниця: Універсум-Вінниця, 2006. 120 с.
8. ДСТУ Б В.2.6 - 189:2013. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2014. 55 с.
9. Філоненко О.І., Юрін О.І. *Будівельна теплофізика огорожувальних конструкцій будівель. Навч. посібник*. Полтава, ПНТУ ім. Ю. Кондратюка. 2015. 328с.
10. Басок Б. І., Давиденко Б. В., Гончарук С. М., Новіцька М. П. Теплофізичне

моделювання теплового режиму будівлі. *Енергозбереження та промислова безпека: виклики та перспективи : науково-технічний збірник: матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції* (4–5 червня 2019 року, м. Київ). Київ : Основа, 2019. С. 9 –19. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38980>.

11. Ковальов В.В. «Розвиток науково-методичних основ організаційно-технологічного проектування реконструкції промислових будівель зі зміною функціонального призначення»: автореф. дис. д-ра техн. наук. 05.23.08. Дніпро, 2021. 32 с.

12. Tkachenko, T., Lis, A., Tsiuriupa, Y., Mileikovskyi, V., Ujma, A., Tkachenko, O., & Sakhnovska, V. Planning of green roofs for the best thermotechnical effect. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences (SREES)*. 2025. 34(1), P. 42–54. <https://doi.org/10.22630/srees.99542022>.

13. Предун К.М. Войналович В.О., Гулієв Дж. Підвищення енергетичної ефективності та біосферосумісності будівель і споруд в Україні. *Містобудування та територіальне планування*. №84. 2023. С.263-275. DOI: 10.32347/2076-815x.2023.84.263-275.

14. Zhelykh, V., Venhryn, I., Kozak, K., Shapoval, S. Solar collectors integrated into transparent fasades. *Production Engineering Archives*. 2020. 26(3), P. 84-87. <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.17>

15. Меньлюк І. Ю. «Науково-методологічні основи вибору організаційно-технологічних рішень цивільного будівництва у прибережній зоні»: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.23.08. Харків, 2020. 36 с.

16. Чернишев Д. О. «Науково-методологічний інструментарій організації будівництва на засадах біосферосумісності»: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.23.08. Дніпро, 2019. 33 с.

17. Сергейчук О. В. Історія та перспективи розвитку норм з енергоефективності будівель в Україні. *Наук.-техн. збірник «Енергоефективність в будівництві та архітектурі»*. Вип. 9. КНУБА, К.: 2017. С. 211-221. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/enef_2017_9_39.

18. Якусевич С. Г., Плоский В. О. Деякі аспекти ефективного влаштування

теплоізоляційної оболонки будинку. *Наук.-техн. збірник «Енергоефективність в будівництві та архітектурі»*. Вип. 9. КНУБА, К.: 2017. С. 259-267. https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/21/2017_9/47.pdf.

19. Polyvianchuk A., Malyarenko V., Kapustenko P., Polyvianchuk N., Petruk H, Arsenyeva O. Estimation of energy, economic and environmental efficiency for renovation of building heating system. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2025. Vol. 27, P. 8797–8812. <https://doi.org/10.1007/s10098-025-03150-8>.

20. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Лялюк О. Г., Ратушняк О. Г. Потенціал енергоефективності огорожувальних конструкцій із біосферосумісних матеріалів: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2022. 136 с.

21. Орлова Н. О. Вплив зміни збурюючих факторів на рівень коефіцієнтів тепловіддачі на зовнішніх поверхнях будинків. *Вісник ВПІ*. №5, 2020. С. 34-40. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-152-5-34-40>

22. Бугаєвський С. О. «Теоретико-методологічні основи формування організаційно-технологічних рішень зведення полегшених залізобетонних конструкцій»: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.23.08. Харків, 2021. 38 с.

23. Венгрин І. І. «Енергоефективні геліосистеми інтегровані в світлопрозорі конструкції будівель»: дис. д-ра філософії: 192. Львів: Наук. університет «Львівська політехніка», 2022. 225 с.

24. Олексієнко О. Б. «Експлуатаційні властивості та довговічність конструкцій фасадної теплоізоляції з тонкошаровою штукатуркою»: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Полтава, 2013. 20 с.

25. Нетеса К. М. «Вдосконалення та визначення раціональних організаційно-технологічних рішень влаштування фасадних систем багатоповерхових цивільних будівель»: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.08. Дніпро, 2021. 24 с.

26. Бабій І. М., Борисов О. О., Кучеренко Л. В., Олійник О. В. Визначення факторів, що впливають на термін утеплення фасадів багатоповерхових будівель. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2021. № 21(2). С. 32-36. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2021-2-32-36>.

27. Багатошарова стінова панель: пат. 123126 Україна: МПК Е048 2/42,

№u201708825; заявл. 04.09.2017, опубл. 12.02.2018, Бюл. №3, 6 с.

28. Meneylyuk O., Babii I., Kucherenko L., Bichev I. Efficiency of operation of external thermal insulation systems from the position of the expediency of repair work. *Modern construction and architecture*. 2025. №12. pp.129-135. DOI: 10.31650/2786-6696-2025-12-129-135.

29. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С. *Термічно неоднорідні енергоощадні огороджувальні конструкції малоповерхових будівель: монографія*. Вінниця: ВНТУ, 2019. 76 с. ISBN 978-966-641-768-1.

30. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Лялюк А. О. Організаційно-технологічні чинники впливу на енергоефективність огороджувальних конструкцій будівель. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. т. 33, № 2, 2022. С. 203–210. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-2-203-210>.

31. Khrystyna Myroniuk, Vasyl Zhelykh, Yurii Furdas, Mike Jesson, Stergios-Aristoteles Mitoulis .Energy-saving of passive ventilation systems in thermally modernized residential buildings – a review. *Energy and Buildings*. Volume 350, 1 January 2026 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116681>.

32. Tkachenko, T., Lis, A., Tsiuriupa, Y., Mileikovskyi, V., Ujma, A., Tkachenko, O., & Sakhnovska, V. Planning of green roofs for the best thermotechnical effect. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences (SREES)*. 2025. 34(1), P. 42–54. <https://doi.org/10.22630/srees.99542022>.

33. Ратушняк Г. С., Очеретний А. М. Енергоаудит багатоповерхових житлових будинків з використання тепловізійних зйомок. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2017. №1 (22). С. 84-93. <https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/506/497>.

34. Ma, Z.J., Cooper, P., Daly, D., & Ledo, L. Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and buildings*. 2012.№ 55, P. 889-902. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.08.018.

35. Szczotka, K., Barwinska-Malajowicz, A., Szymiczek, J., & Pyrek, R. Thermomodernization as a mechanism for improving energy efficiency and reducing

emissions of pollutants into the atmosphere in a public utility building. *Energies*. 2023. 16(13). DOI 10.3390/en16135026.

36. Nuruddin, M.F, Puad, N.H.A, Azizli, K.A.M, Farhan, S.A, & Zainal, A. (2014). Prospect of Adopting Kapok Fibre as Roof Insulation. *Structural, environmental, coastal and offshore engineering*. 2014. Volume 567, P. 482-487. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.567.482.

37. Zhang, Y., Sun, H., Long, J., Zeng, L., & Shen, X. Experimental and Numerical Study on the Insulation Performance of a Photo-Thermal Roof in Hot Summer and Cold Winter Areas. *Buildings*. 2022. Volume 12, 410. <https://doi.org/10.3390/buildings12040410>.

38. Joshi, V. V. Heat transfer characterization of test rooms with six different roofs. *International journal of heat and technolog*. 2020. Volume 38(1), P. 131-136. DOI 10.18280/ijht.380114.

39. Dong L., Yumeng Z., Changyu L., Guozhong W. Numerical analysis on thermal performance of roof contained PCM of a single residential building. *Energy Conversion and Management*. 2015. Volume 100. P. 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.014>, 2-s2.0-84929310952.

40. Jayalath, L. Aye, P. Mendis, T. Ngo. Effects of phase change material roof layers on thermal performance of a residential building in Melbourne and Sydney. *Energy and Buildings*. 2016. vol. 121. P. 152–158. <https://www.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.007>.

41. Lu S., Chen, Y., Liu, S., Kong, X. Experimental research on a novel energy efficiency roof coupled with PCM and cool materials. *Energy and Buildings*. 2016. vol. 127. P. 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.080>.

42. Semko, O., Yurin, O., Avramenko, Y., Skliarenko, S. Thermophysical aspects of reconstruction of cold roof spaces. *6th international scientific conference reliability and durability of railway transport engineering structures and buildings (Transbud-2017)*. 2017. Tom 116. DOI 10.1051/mateconf/201711602030.

43. Diakaki, C., Grigoroudis, E., Kolokotsa, D., Kalaitzakis, K., &Stavarakakis, G. A multi-objective decision model for the improvement of energy efficiency in buildings. *Energy*. 2010. 35(12), 5483-5496. DOI 10.1016/j.energy.2010.05.012.
44. Renovation Wave [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/renovation-wave_en.
45. ДБН В.1.2-11:2021 Основні вимоги до будівель і споруд. Енергозбереження та енергоефективність. [Чинний від з 2022-09-01]Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 20 с.
46. ДСТУ 9190:2022 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. [Чинний від з 2023-03-01]. ДП «УкрНДНЦ», 2022. 156 с.;
47. ДСТУ 9191:2022 Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. [Чинний від з 2023-03-01]. ДП «УкрНДНЦ», 2022. 63 с.;
48. ДСТУ-Н Б В.2.6-191:2013 Настанова з розрахункової оцінки повітропроникності огорожувальних конструкцій. [Чинний від з 2014-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2014. 13 с.;
49. ДСТУ Б В.2.6-100:2010 Конструкції будинків і споруд. Методи визначення теплостійкості огорожувальних конструкцій. [Чинний від з 20.01.2010] ДП «УкрНДНЦ», 2010.
50. ДСТУ Б В.2.7-182:2009 будівельні матеріали. Методи визначення терміну ефективної експлуатації та теплопровідності ізоляційних матеріалів у розрахункових та стандартних умовах. [Чинний від з 01.12.2009]Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2010. 22 с.
51. ДСТУ Б В.2.2-39:2016 Методи та етапи проведення енергетичного аудиту будівель. [Чинний від з 2017-01-01] ДП «УкрНДНЦ», 2017. 50 с.
52. ДСТУ – Н Б А.2.2-13:2015 Енергетична ефективність будівель. Настанова з проведення енергетичної оцінки будівель. [Чинний від з 2016-01-01]Київ: Мінрегіон України, 2015. 29 с.

53. ДСТУ – Н Б В.2.6-190:2013 Настанова з розрахункової оцінки показників теплостійкості та тепло засвоєння огорожувальних конструкцій [Чинний від з 2014-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2014.

54. ДСТУ – Н Б В.2.6-214:2016 Настанова з улаштування та експлуатації дахів будинків, будівель і споруд. [Чинний від з 2017-04-01] ДП «УкрНДНЦ», 2017. 28 с.

55. ДСТУ – EN 15232-1:2017 (EN 15232 – 1:2017, IDT) Енергоефективність будівель. Частина 1. Вплив автоматизованих систем моніторингу та управління будівлями. Модулі М10-4, 5, 6, 7, 8, 9, 10. [Чинний від з 2017-08-01] ДП «УкрНДНЦ», 2017. 108 с.

56. Деякі питання стратегічного розвитку енергетичної ефективності будівель. Постанова кабінету Міністрів України від 29 грудня 2023 р. № 1228-р Київ [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1228-2023-%D1%80#Text>.

57. Про затвердження Порядку обміну інформацією між Державним агентством з енергоефективності та енергозбереження та кваліфікаційними організаціями. Постанова кабінету Міністрів України від від 25 листопада 2022 р. № 1315 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1315-2022-%D0%BF#Text>.

58. Опря Є. М., Лялюк О. Г., Дудар І. Н., Лялюк А. О. Оцінка стану організаційно-технологічних рішень у сфері облаштування, експлуатації та термомодернізації покриттів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Вінниця: Універсам-Вінниця, № 2, 2024. С. 181–192. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-2-181-192>.

59. Опря, Є., Лялюк, А., Лялюк, О. Сучасний стан і проблеми, пов'язані з процесом улаштування енергозберігаючого покриття будівлі та шляхи їх вирішення. *Міжнародна науково-практична конференція «Енергоефективність в галузях економіки України-2024»*, м. Вінниця, 20.11.2024. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2024/paper/viewFile/22636/18691>

60. Ратушняк Г. С., Горюн О. Ю., Лялюк А. О. Моделювання теплопередавання у вузлі примикання віконного блоку до зовнішньої стіни. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Т. 29, № 2. 2020. С. 113–118. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-2-113-118>.
61. Biks Y., Wan Z., Lyalyuk O., Lyalyuk A. Management model for the construction's waste use in walls manufacturing. *Architecture, Civil Engineering and Environment*. 2024. Vol. 17(2). P. 87–99. (Web of Science, ISSN 1899-0142). URL: <https://doi.org/10.2478/acee-2024-0015>
62. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Лялюк А. О. Методи моделювання організаціо-технічного забезпечення рішень з удосконалення теплоізоляційної оболонки будівель. *Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні технології в будівництві»*, м. Вінниця, 23.11.2022. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2022/paper/viewFile/16617/13847>.
63. Ратушняк Г.С., Бікс Ю.С., Лялюк О.Г., Лялюк А.О. Алгоритм реалізації проекту управління теплової відмови теплоізоляційної оболонки будівлі. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2019. №1. С. 140-146. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-1-140-146>.
64. Ратушняк Г.С., Горюн О.Ю., Лялюк О. Г. Аналіз впливу факторів на надійність забезпечення енергоефективності огорожувальних конструкцій у вузлах примикання з використання лінгвістичних змінних. *Наук.-техн. зб. «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання»*. К.: КНУБА, Вип. 40. 2022. С. 28-36. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2022.40.28-36>.
65. Bix Yu., Ratushniak G., Lyalyuk A. Thermal performance assessment of wall assemblies: criteria importance theory and ahp approach. *The civil engineering journal*. Vol. 2. 2022. P. 235-248. URL : DOI:10.14311/CEJ.2022.02.0018.
66. Барабаш М.С. *Основи комп'ютерного моделювання* / М.С. Барабаш, П.М. Кір'язєв, М.А. Ромашкіна // Навчальний посібник. К.: НАУ, 2018. 492 с. ISBN: 978-966.

67. Татарченко Г.О., Татарченко З.С., Паніна Н.І., Білошицька Н.І. 3D-моделювання будівельних об'єктів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Вип. 16, 2021. С. 194-204. ISSN 2410-6208.
68. Трач Р.В. Інформаційне моделювання в будівництві (BIM): Сутність, стани становлення та перспективи розвитку. Миколаївський національний університет. Зб. "Глобальні та національні проблеми економіки», 2017. Вип. 16. С. 490-495. <http://global-national.in.ua/issue-16-2017/24-vipusk-16-kviten-2017-r/2966-trach-r-v-informatsijne-modelyuvannya-v-budivnitstvi-bim-sutnist-etapi-stanovlennya-ta-perspektivi-rozvitku>
69. Шибко О.М. Інформаційне моделювання будівель та споруд. *Tendencias scientifiques de la recherche of appliance*. 2020. Volume 1. Р. 104-105. <https://doi.org/10.36074/30.10.2020.v1.31>.
70. Менейлюк І. О. Вибір організаційних рішень будівництва торговельно-розважального центру за критерієм інтенсивності фінансування. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2019. Т.26. №1. С. 114-119. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-1-114-119/>
71. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Експериментальні дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів із мінеральної вати. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2022. Т.32. №1. С. 43-48. URL: doi 10.31649/2311121429-2022-1-43-48.
72. Фаренюк Г.Г., Філоненко О.І., Тимофєєв М.В. Енергоефективність громадських будинків з врахуванням ергономіка теплового середовище. *Комунальне господарство міст*. 2017, випуск 135 С. 119-124. ISSN 0869-1231.
73. Подолец Р. З. Енергетичне моделювання : іноземний досвід іноземних перспективних досліджен в Україні . Зб .Економіко - математичні методи та моделі прогнозування. 2006, С. 126-140. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/19804/09--Podolec.pdf?последовательность=1>
74. Дешко В.І., Суходуб І.О., Сердечний П.Ю. Використання енергетичного моделювання будівель при розробці проектів з підвищення енергоефективності.

Вісник Київського національного університету технологій та дизайн. Серія технічних наук. 2019. №4 (136). С. 86-96. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/14476>

75. Титюк А. А., Ярова Т. П., Серeda С. Ю., Вершкова Ю. С., Сопільник Ф.М., Мосьпан Є. В. Використання BIM-моделювання для розрахунку теплотрат та загальної енергоефективності на етапи проектування. *Український журнал будівництва та архітектури.* №6 (018). 2023. С. 119-124. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.261223.118.1014>.

76. Находов В.Ф., Іванько Д.О., Головка А.В. Вибір методів математичного моделювання процесів енергоспоживання в системах оперативного контролю енергоефективності. *Енергетика, економіка, технології, екологія: науковий журнал.* 2013. Спецвипуск. С. 20-27. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/11403>.

77. Кащєнко Т.О. Енергозбереження і прогностика в архітектурі містобудування. *Наук.-техн. збір.* 2007. С. 51-57. https://vlp.com.ua/files/11_5.pdf

78. Осипенко Р. С., Лялюк О. Г., Мельник Д.О. Системи підтримки прийняття рішень в будівельних проектах на основі мереж Байєса. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві.* 2024. Т.36. № 1. С.96-102. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-96-102>.

79. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Формалізація та ієрархічна класифікація параметрів впливу на енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві.* 2023. Т. 35. № 2. С. 98–103. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-2-98-103>

80. M. Voynarenko, V. Hurochkina, V. Dzhezdzhula and I. YEPIFANOVA. Applying Fuzzy Logic to Modeling Economic Emergence. *Wseas transactions on business and economics.* Volume 18, 2021. p.424-433. doi: 10.37394/23207.2021.18.43. <https://doi.org/10.37394/23207.2021.18.43>.

81. Опря Є. М., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Аналіз фізичних та математичних моделей організаційно-технологічного забезпечення рішень з удосконалення теплоізоляційних властивостей енергозберігаючого покриття будівлі: *матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Енергоефективність в галузях економіки України»*

2025». (м. Вінниця, 20 лист. 2025). Вінниця. 2025. С. 225–228. ISBN: 978-617-8163-73-0; URL: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/939/1636/2956-1>.

82. Фаренюк Г. П. *Основи забезпечення енергоефективності будинків та теплової надійності огорожувальних конструкцій: монографія*. Київ: Гамма-Принт, 2009. 137 с.

83. Пічугін С. Ф., Семко В. О. Імовірність теплової відмови огорожувальних конструкцій із сталевих холодно-формованих елементів за критерієм зниження локальних температур. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. Вип. 160. С. 25-34. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.160.2016.69985>.

84. Дешко В. І., Буяк Н. А. Вплив теплового захисту будівлі на показники теплового комфорту. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2015. Вип. 153. С. 121-128. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.153.2015.64339>.

85. Пашинський В. А., Плотніков О. А. Методика імовірнісного оцінювання температурного режиму стін. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2014. Вип. 142 (2). С. 138-143.

86. Семко В. О. Методика визначення ймовірності теплової відмови огорожувальних конструкцій із сталевиххолодноформованих елементів за теплотехнічними показниками. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудівництво*. 2016. Вип. 91. С. 140-147. ISSN 2415-7031.

87. Петренко В. О., Петренко А. О., Голякова І. В., Петренко В. В. Прогнозування температури внутрішнього повітря в приміщеннях з дефектами зовнішніх огорожувальних конструкцій. *Енергетика, екологія, комп'ютерні технології, безпека життєдіяльності в будівництві*. Колективна монографія. ДВНЗ Придніпровська державна академія. 2018. С.70-78.

88. Zavadskas E., Raslanas S., Kaklanskas A. The selection of effective retrofit scenarios for panel hooses in urban neighlorhoods based on expected energy savings and inecrease im market value: *The Vilnius casell Energy and Buildings*. 2008. –Т. 40. №4. С. 573-587. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.015>

89. F. Dominguez-Munoz, B. Anderson, I. M. Gejndo-Lopez, A. Carrilo-Anderes. Uneertainty in the Thermal Conductivity of Insulation Materials. *Energy and buildings*. 2010. P. 2159-2168. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.006>
90. Stankevicius V, Kairus L., Karbauskaite J. Heat flux through the timber walls under summer climate conditions in eastern Europe. *Civil Engineering and management*. 2006. 12(1). P. 77-82. <https://doi.org/10.3846/13923730.2006.9636376>
91. Чернявський В. А., Пашенко А. М., Борисенко О. Б., Лопатків Р. В. Аналіз розкриття тріщин декоративно-штукатурного шару фасадної системи залежно від температури та вологості зовнішнього повітря. *Збірник наукових праць [Полтавського національного університету ім. Ю. Кондратюка] сер.: Галузеве машинобудування, будівництва*. 2010. Вип. 2. С. 147-151.
92. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Ратушняк О. Г. Фактори надійності забезпечення енергоефективності багатошарових теплоізоляційних будівельних виробів із застосуванням солом. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2018. Т.25. №2. С. 25-30. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2018-2-25-30>.
93. Г.С. Ратушняк, Ю.С. Бікс, А.О. Лялюк. Моніторинг та експертно-аналітична оцінка надійності теплоізоляційної оболонки будівель. *Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві*. 2023. Т.34. №1. С. 140-145. DOI 10.31649/2311-1429-2023-1-140-145
94. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. [Чинний від з 2019-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2018. 33 с.
95. Опря Є. М., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Optimization of thermal modernization technologies for building coverings to improve energy efficiency and thermal insulation properties: *матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф. Future of Science: Innovations and Perspectives*. (Стокгольм (Швеція), 21–23 квітня 2025). Стокгольм (Швеція). 2025. С. 119–123. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2025/04/FUTURE-OF-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PERSPECTIVES-21-23.04.25.pdf>.

96. Лялюк О. Г., Опря Є. М., Лялюк А. О. Удосконалення теплоізоляційних властивостей енергозберігаючого покриття будівлі. *Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи. ВНТУ*. Вінниця. 2025. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/schedConf/presentations?track=948>.
97. Biks Y., Lyalyuk O., Ratushnyak G., Ratushnyak O., Lyalyuk A. Energy efficiency assessment of heat insulation building products: fuzzy-probabilistic approach. *Architecture Civil Engineering Environment*. 2021. № 1. P. 59-68. URL: <https://doi.org/10.21307/acee-2021-006>.
98. Gloyne A.R. Energy analysis of the support system. New-York-Toronto-London. 1984. 308 p.
99. Morgan R. Energy analysis of industrial activities Glasgow, VK. 1983. 164 p
100. Про енергозбереження: Закон України від 01.07.94 р. № 74/94-ВР. Дата оновлення: 23.07.2017. URL: <https://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/74/94-вр> (Дата звернення: 23.02.2019).
101. Дудар, І. Н., Лялюк, О. Г., & Лялюк, А. О. Шляхи утеплення складних поверхонь. *Матеріали LI науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 31 травня 2022 р. Електрон. текст. дані. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2022/paper/view/15266>.
102. Ратушняк Г. С., Гончарук В. С., Лялюк А. О. Енергетична ефективність теплозахисту огорожувальних конструкцій будівель: *матеріали 51-ї наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ*. (м. Вінниця, берез. 2022). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2022/paper/view/14866>.
103. Мітюшкін Ю.І., Мокін Б.І., Ротштейн О.П. *Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знань. Монографія*. Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця. 2002. 145 с. ISBN 966-641-051-6.
104. Ратушняк Г.С., Лялюк А.О. Експертне оцінювання енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель нечіткими множинами та лінгвістичними змінними. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. Вип. 52, 2025. С. 85-92. URL: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.52.85-96>

105. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Ратушняк Д. А., Лялюк А. О. Моделювання системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень з оцінювання енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель з використанням лінгвістичних змінних. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2024. Т.36. № 1. С. 91–95. URL: DOI 10.31649/2311-1429-2024-1-91-95.
106. Zadeh L. A. Fuzzy logic – a personal perspective. *Fuzzy Sets and Systems*. 2015. Vol. 281. P. 4–20. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2015.05.009>.
107. Кравець П., Киркало Р. Системи прийняття рішень з нечіткою логікою. *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*. 2009. N 650. С. 115–123. https://vlp.com.ua/files/special/17_0.pdf.
108. О. Г. Зінов'єва. Використання нечіткої логіки в системах прийняття рішень. *ВІСНИК ХНТУ*. 1(92), Ч. 2, 2025 р. С.71-75. DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.2.10>.
109. S. D. Shtovba, O. D. Pankevich, 105109 A. V. Nagorna Analyzing the Criteria for Fuzzy Classifier Learning. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2015, Vol. 49, N. 3, pp. 123–132. DOI: 10.3103/S0146411615030098
110. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Інформаційне забезпечення моделювання теплотехнічних параметрів огорожувальних конструкцій з використанням методів багатокритеріального аналізу: тези доп. . наук.-практ. конф. «Енергоефективність в галузях економіки України-2023». (м. Вінниця, 23 листоп. 2023). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2023/paper/view/19050>
111. Лялюк А. О., Лялюк О. Г. Моделювання системи прийняття конструктивно-технічних рішень вибору енергозберігаючого покриття будівлі. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2019. Т.27. № 2. С. 145–154. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-145-154>.
112. Лялюк А. О., Бікс Ю. С. Використання методик багатокритеріального аналізу в галузі енергоефективності: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в будівництві». Вінниця, 2020. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2020/paper/view/10794>.

113. Лялюк А. О., Лялюк О.Г. Класифікація факторів впливу на вибір фінансового механізму енергозберігаючого проекту: *матеріали XLVII наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ*. (м. Вінниця, черв. 2018.). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/index/pages/view/zbirn2018>
114. Лялюк А. О., Панкевич В. В., Ратушняк О. Г., Лялюк О. Г. Управління факторами, які впливають на вибір фінансового механізму енергозберігаючого проекту. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2018. Т.24. № 1. С. 94 –100. URL: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/607077>
115. Лялюк А. О., Лялюк О.Г. Оцінка ризиків енергозберігаючого проекту: *матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в будівництві»*. Вінниця, 2018. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2018/paper/viewFile/5973/4952>.
116. Zhang H., Lyalyuk O., Lyalyuk A. The use of modern materials in the construction of external walls of energy-efficient buildings: *тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в будівництві»*. (м. Вінниця, 23 листоп. 2022). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2022/paper/view/16682>.
117. Лялюк А. О., Лялюк О. Г. Застосування екомаркетингу в будівництві: *тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. «Енергоефективність в галузях економіки України»*. Вінниця, 2019. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2019/paper/view/8255>.
118. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Функції належності нечітких оцінок впливу визначальних параметрів на прогнозовану енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель: *матеріали V-ї міжнар. наук.-практ. конф. Енергія. Ресурси. Екологія – багатофункціональні еко- та енергоефективні, ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях*. (м. Київ, 27–29 листоп. 2024). С. 31–32. URL: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/ere-2024-ua.pdf>.
119. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Моделювання енергетичної ефективності огорожувальних конструкцій будівель з використанням функцій належності: *матеріали 53-ї наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ*. (м. Вінниця, берез.

2024). Вінниця. 2024. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2024/paper/view/20439/16916>.

120. Сааті Т. Л. Відносний вимір та його узагальнення у прийнятті рішень. Чому парні порівняння є ключовими в математиці для вимірювання невлених факторів. *Cloud Of Science*. 2016. Т. 3, № 2. С. 171-262. URI: https://cloudofscience.ru/sites/default/files/pdf/CoS_3_171.

121. Дудар І. Н., Риндюк С. В. Енергоефективні матеріали і конструкції для теплового захисту будівель і споруд. *Будівельні конструкції*. 2017. Т. 22. №2. С. 31-35. <https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/523/508>

122. ДСТУ Б.В.2.6-101.2010 Конструкції будинків і споруд. [Чинний від 2010-01-01] Київ: Мінрегіонбуд України. 2010. 25 с.

123. Дудар І. Н., Кучеренко Л. В., Швець В. В. *Енергозбереження в житловому будівництві: навч. посібник. Ч. 1*. Вінниця: ВНТУ, 2015. 57 с.

124. Савйовський В. В. *Термомодернізація будівель: навч. посіб.* Київ: Видавництво Ліра –К, 2025. 216 с. ISBN 978-617-520-891-5.

125. Теплоізоляція фасадів будівель системними рішеннями ThermoELF: Навчальний посібник / уклад.: Молодід О. С., Скочко В. І., Кожедуб С. А. та ін., Київ: Видавництво Ліра К, 2021. 278 с. ISBN978-617-520-891-5.

126. Маляренко В. А., Герасимова О. М., Малєєв О. Г. *Будівельна теплофізика. Курс лекцій*. Харків, ХНАМГ, 2007. 100 с.

127. ДСТУ-Н Б.В.2.6-192.2013 Настанова з розрахункової оцінки тепловологісного стану огорожувальних конструкцій [Чинний з 01.01.2014] Київ: Мінрегіон України, 2014. 50 с.

128. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Дослідження теплопровідності теплоізоляційного матеріалу з врахуванням вологовмісту: *матеріали III Всеукр. наук. конф. здобувачів освіти і молодих учених. Відбудова транспортної інфраструктури України*. (м. Київ, 2025). С. 72. ISBN: 978-966-632-331-9 URL: https://drive.google.com/file/d/1rYmW-l8i9qIMOyGFqKIntPD0SmWiq_iI/view

129. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Дослідження впливу вологовмісту теплоізоляційного матеріалу на його теплопровідність: *матеріали*

LIV Всеукр. наук.-техн. конф. Підрозділів ВНТУ (м. Вінниця, березень 2025). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2025/paper/view/23693/19568>.

130. Меньлюк О.І., Руссий В.В. Аналіз відомих методик пошуку оптимальних рішень пошкоджених будівель. *Технічні науки та технології*. 2023. №2(32). С. 355-362. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-355-362](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-355-362).

131. Meheiljuk A., Kyryliuk S., Cherepashchuk I. Development of costeffective enelosing strnetures with high heat transfer resistance. 2023. DOI://10.1051/e3sconf/2021/25809040

132. ДСТУ-Н Б.В.2.6-192.2013 Настанова з розрахункової оцінки тепловологісного стану огорожувальних конструкцій [Чинний з 01.01.2014] Київ: Мінрегіон України, 2014. 50 с.

133. Голоскоков О.Є. *Основи регресійного аналізу. Навчальний посібник*. Харків: НТУ «ХП». 2008. 91 с. <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/ab4d5191-6808-45e6-a03a-44ab09955023/content>

134. Грабар І.Г., Воляницький Г.П. *Теорія та технологія наукових досліджень. Навчальний посібник*. Житомир: ЖДТУ. 2013. 260 с. https://www.academia.edu/35099377/%D0%93%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%B0%D1%80_%D0%A2%D0%B5%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%8F_%D0%BD%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%85_%D0%B4%D0%BE%D1%81%D0%BB%D1%96%D0%B4%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D1%8C.

135. Штовба С.Д., Галушак А.В. Ідентифікація багатofакторних залежностей за допомогою баз знань. Лабораторний практикум: електронний навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ. 2015. 96 с. DOI: 10.13140/RG.2.1.3698.0245

136. Лялюк А. О. Планування багатofакторного експерименту при дослідженні впливу вологовмісту теплоізоляційного матеріалу на його теплопровідність. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Вінниця: Універсам-Вінниця, № 2, 2025. С. 149–155. DOI <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2025-2-149-155>

137. Установка для визначення теплопровідності будівельних матеріалів: пат. 141390 Україна: МПК G01N 25/18,20.Nou201908718; заявл. 19.07.2019; опубл. 10.04.2020, Бюл. №7, 5 с.

138. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Ратушняк О. Г., Лялюк А. О. Установка для дослідження теплопровідності енергоефективних теплоізоляційних матеріалів рослинного походження. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Вінниця: Універсам-Вінниця, т. 28, № 1. 2020. С. 100–107.

139. Лялюк А. О., Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С. Моделювання теплопередачі через зовнішній багатошаровий солом'яний стіновий блок. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2018. Т.24. № 1. С. 50–55. URL <https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/555/535>

140. Бікс Ю. С., Ратушняк О. Г., Лялюк А. О. Комплексна оцінка потенціалу енергоефективності багатошарових огорожувальних конструкцій стін: *матеріали міжнар. наук.-практ. конф. Енергозбереження в будівництві*. (м. Вінниця, 24 лист. 2021.). <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2021/paper/viewFile/14065/11907>

141. Лялюк А. О., Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С. Моделювання теплотехнічних параметрів багатошарових огорожувальних конструкцій із теплоізоляційних матеріалів органічного походження: *матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в будівництві»*. (м. Вінниця, листопад 2018). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-ebmd/itb2018/paper/view/6142/5121>

142. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Лялюк А. О. Зовнішній стіновий теплозвукоізоляційний блок: МПК E04C 2/10. пат. 121651 Україна; заявл. 26.06.2017; опубл. 11.12.2017. Бюл. №23.

143. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Тітко О. В., Лялюк А. О. Багатошаровий теплоізоляційний стіновий блок: E04C 1/40, E04B 2/00. пат. 130548 Україна; заявл. 11.06.2018; опубл. 10.12.2018. Бюл. № 23.

144. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Лялюк А. О. Каркасна стінова панель із теплозвукоізоляційних солом'яних блоків: E04B 2/00, E04B 1/74, E04C 2/00. пат. 127505 Україна; заявл. 15.02.2018; опубл. 10.08.2018. Бюл. № 15.

145. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Ущільнення матеріалів рослинного походження при виготовленні теплоізоляційних будівельних матеріалів: *матеріали XLVIII наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ*. (м. Вінниця, черв. 2019.). Вінниця. 2019. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2019/paper/view/7050/5726>
146. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Коц І. В., Лялюк А. О. Установка для виготовлення солом'яних блоків заданої щільності та геометричних розмірів: пат. 128148 Україна; заявл. 26.03.2018; опубл. 10.09.2018. Бюл. № 17.
147. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Ратушняк О. Г., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Світлопрозора огорожувальна конструкція: пат. 154989 UA, № u 202302044; заявл. 01.05.2023; опубл. 10.01.2024, Бюл. № 2. 4 с. : кресл.
148. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Ратушняк О. Г., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Світлопрозора огорожувальна конструкція: пат. 157760 UA, № u 202401845; заявл. 10.04.2024; опубл. 21.11.2024, Бюл. № 47. 3 с. : кресл.
149. Ратушняк О. Г., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Управління фінансовими механізмами з реалізації енергозберігаючих проектів: колект. монографія «Соціально-економічні засади формування та функціонування економіки України» за заг. ред. О. О. Непочатенко, д.е.н., проф. Умань: Видавець Сочінський М. М., 2019. 276 с. (С. 75 – 80). ISBN 978-966-304-287-9
150. Лялюк А. О., Лялюк О. Г. Шляхи забезпечення зростання фінансування інновацій в будівництві: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Енергоефективність в галузях економіки України». (м. Вінниця, 5 жовт. 2017.). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2017/paper/viewFile/3397/2847>

ДОДАТКИ

Додаток А
АНКЕТА ЕКСПЕРТНОГО ОЦІНЮВАННЯ
Організаційно-технічних рішень енергоефективності
огороджувальних конструкцій

ПІБ експерта: _____

Організація: _____

Посада: _____

Досвід роботи (років): _____

Галузь спеціалізації: _____

Дата заповнення: _____

Інструкція: Оцініть кожен показник, використовуючи лінгвістичні значення (Н- низький, С-середній, В- високий), числову шкалу. За необхідності вкажіть коментар.

Основна таблиця для заповнення

№	Група факторів (A/B/C/D)	Назва показника	Опис показника	Лінгвістична оцінка	Мін значення	Макс значення	Найбільш ймовірне значення
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

ДОВІДКОВИЙ БЛОК:

Групи факторів:

A – Організаційні

B – Технічні

C – Економічні

D – Екологічні та експлуатаційні.

Шкали лінгвістичних оцінок та універсальні множини факторів впливу

Додаток Б

Функції належності для лінгвістичних змінних

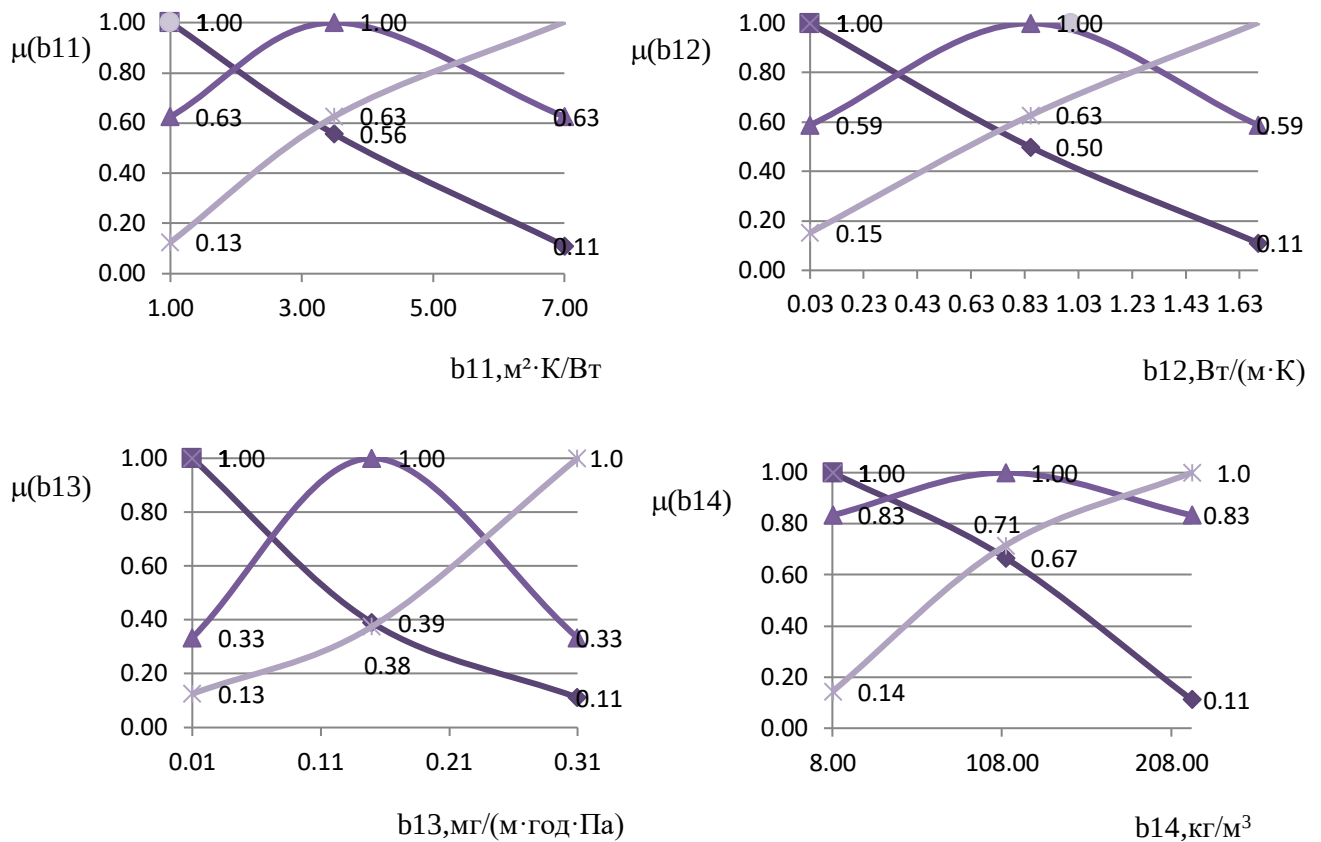


Рисунок Б.1 – Функції належності для лінгвістичних змінних групи – теплотехнічні параметри: b_{11} - приведений опір теплопередачі; b_{12} - теплопровідність матеріалів; b_{13} - коефіцієнт паропроникності; b_{14} – густина утеплювача.

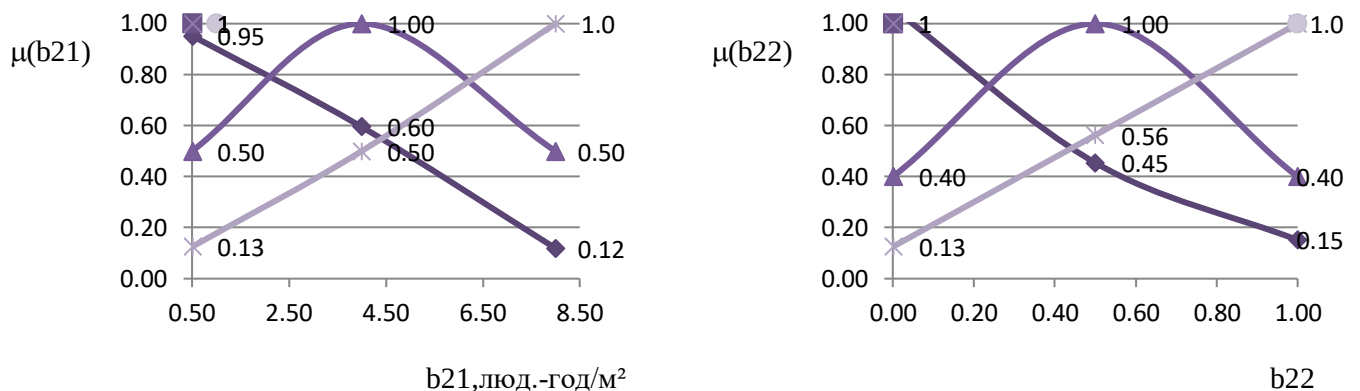


Рисунок Б.2 – Функції належності для лінгвістичних змінних групи технологічність конструктивного рішення: b_{21} – трудомісткість; b_{22} – ремонтпридатність.

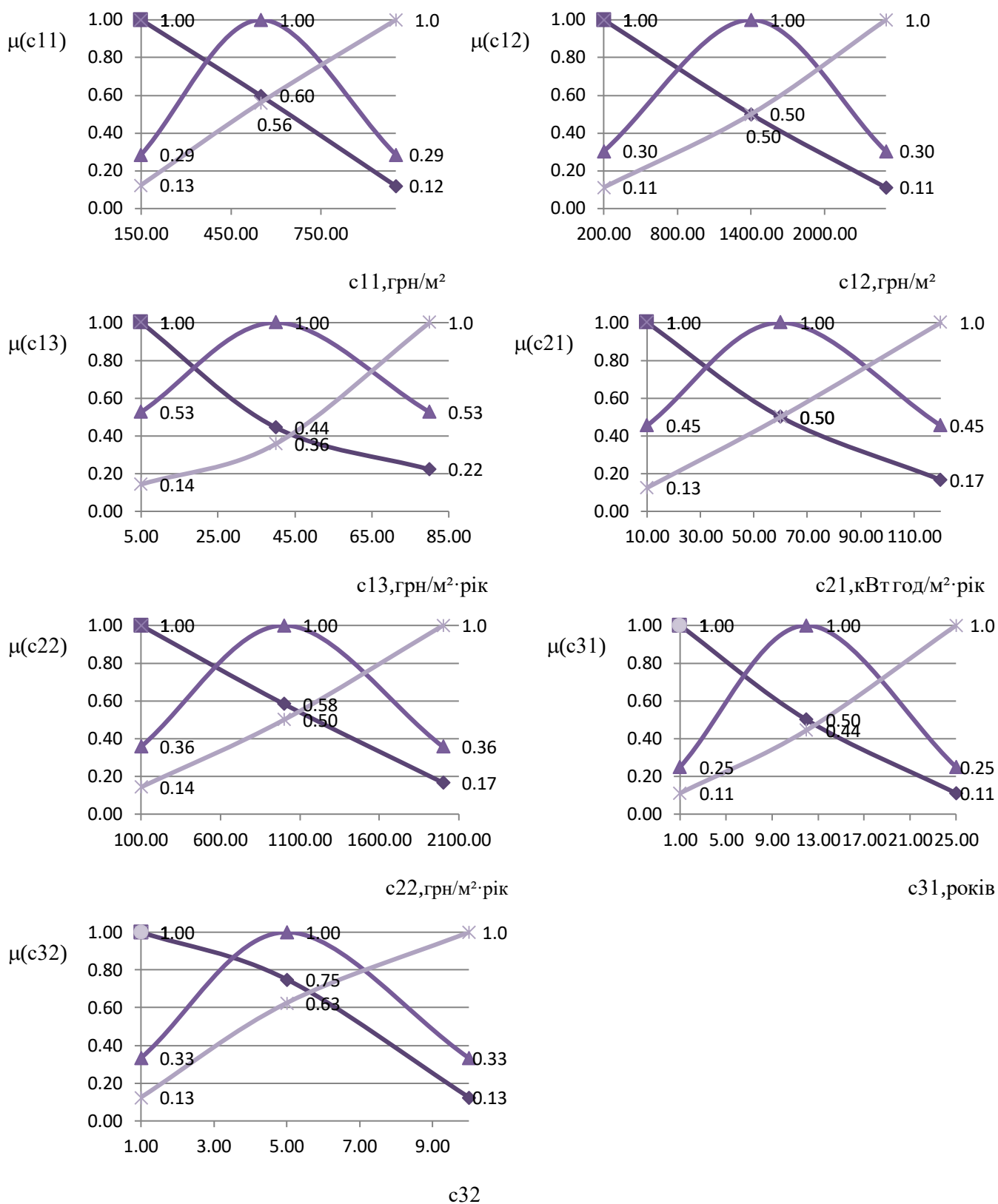


Рисунок Б.3 – Функції належності для лінгвістичних змінних групи С– економічні фактори : c11 - витрати на утеплювальні матеріали; c12 - витрати на монтаж; c13 - вартість експлуатації конструкції; c21 - щорічне зменшення витрат на опалення/охолодження; c22 - енергетичний ефект з урахуванням тарифів; c31 - термін окупності; c32 - індекс рентабельності.

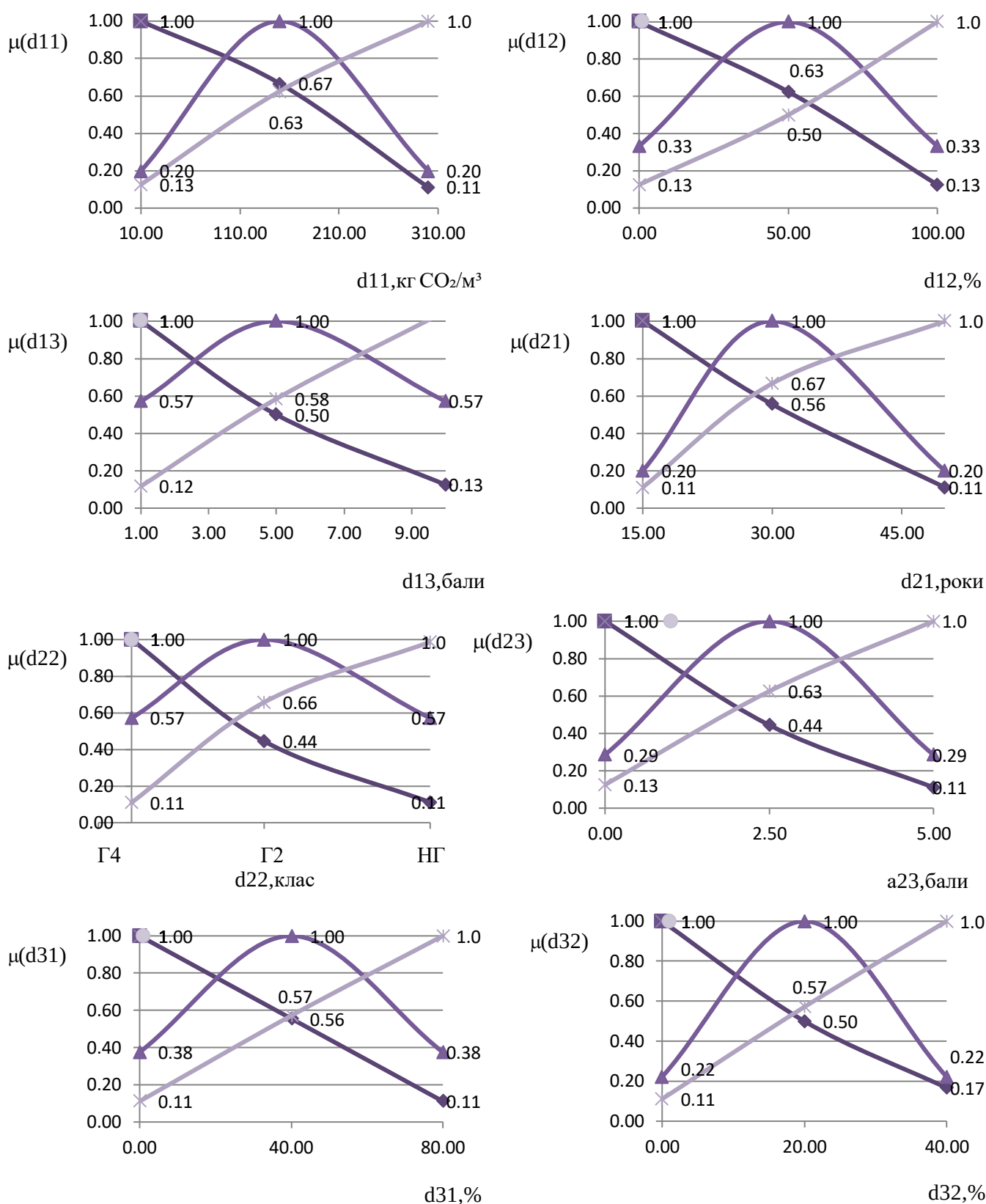


Рисунок Б.4 – Функції належності для лінгвістичних змінних групи D– екологічні та експлуатаційні фактори: d11 - рівень викидів CO₂ при виготовленні; d12 - можливість переробки; d13 - шкідливість; d21 - термін ефективної експлуатації; d22 - вогнестійкість; d23 - біостійкість; d31 - ймовірність появи конденсату; d32 -ризик пошкоджень фасаду.

Додаток В

Матриці знань

Таблиця В.1 – Матриця знань для залежностей (2.15)

Якщо	Теплотехнічні параметри	Н	С	Н	С	В	С	В
	Технологічність конструктивного рішення	Н	Н	С	С	В	В	С
То	Технічні фактори	Низькі (Н)			Середні (С)	Високі (В)		

Таблиця В.2– Матриця знань для залежностей (2.49)

Якщо	Приведений опір теплопередачі	Н	С	Н	С	С	С	В	С	В
	Теплопровідність матеріалів	В	В	С	С	С	Н	Н	Н	С
	Коефіцієнт паропроникності	Н	Н	Н	С	Н	С	В	В	В
	Густина утеплювача	С	С	Н	С	С	С	В	В	В
	Вологість утеплювача	В	В	С	С	С	С	Н	Н	С
То	Теплотехнічні параметри	Низькі (Н)			Середні (С)			Високі (В)		

Таблиця В.3 – Матриця знань для залежностей (2.53)

Якщо	Трудомісткість	В	С	В	С	Н	С	Н
	Ремонтопридатність	Н	Н	С	С	В	В	С
То	Технологічність конструктивного рішення	Низькі (Н)			Середні (С)	Високі (В)		

Таблиця В.4 – Матриця знань для залежностей (2.16)

Якщо	Вартість впровадження	Н	Н	Н	С	С	Н	В	С	В
	Оцінка економії енергії	Н	Н	С	С	С	С	В	В	В
	Інвестиційна привабливість	Н	С	Н	С	Н	С	В	В	С
То	Ефективні фактори	Низькі (Н)			Середні (С)			Високі (В)		

Таблиця В.5 – Матриця знань для залежностей (2.60)

Якщо	Витрати на утеплювальні матеріали	Н	Н	С	С	С	Н	В	В	В
	Витрати на монтаж	Н	Н	Н	С	Н	С	В	С	В
	Вартість експлуатації конструкції	Н	С	Н	С	С	С	В	В	С
То	Вартість впровадження	Низькі (Н)			Середні (С)			Високі (В)		

Таблиця В.6 – Матриця знань для залежностей (2.64)

Якщо	Щорічне зменшення витрат на опалення/охолодження	Н	С	Н	С	В	С	В
	Енергетичний ефект з урахуванням тарифів	Н	Н	С	С	В	В	С
То	Економія енергії	Низькі (Н)			Середні (С)		Високі (В)	

Таблиця В.7 – Матриця знань для залежностей (2.68)

Якщо	Термін окупності	В	С	В	С	Н	С	Н
	Індекс рентабельності	Н	Н	С	С	В	В	С
То	Інвестиційна привабливість	Низькі (Н)			Середні (С)		Високі (В)	

Таблиця В.8 – Матриця знань для залежностей (2.17)

Якщо	Екологічність матеріалів	Н	Н	Н	С	С	Н	В	С	В
	Довговічність конструкції	Н	Н	С	С	С	С	В	В	В
	Інвестиційна привабливість	Н	С	Н	С	Н	С	В	В	С
То	Експлуатаційні ризики	Низькі (Н)			Середні (С)			Високі (В)		

Таблиця В.9 – Матриця знань для залежностей (2.75)

Якщо	Рівень викидів CO ₂ при виготовленні	В	В	С	С	С	В	Н	Н	Н
	Можливість переробки	Н	Н	Н	С	Н	С	В	С	В
	Шкідливість	В	С	В	С	С	С	Н	Н	С
То	Екологічність матеріалів	Низькі (Н)			Середні (С)			Високі (В)		

Таблиця В.10 – Матриця знань для залежностей (2.79)

Якщо	Термін ефективною експлуатації	Н	Н	С	С	С	Н	В	С	В
	Вогнестійкість	Н	Н	Н	С	Н	С	В	В	В
	Біостійкість	Н	С	Н	С	С	С	В	В	С
То	Довговічність конструкції	Низькі (Н)			Середні (С)			Високі (В)		

Таблиця В.11 – Матриця знань для залежностей (2.83)

Якщо	Ймовірність появи конденсату	Н	С	Н	С	В	С	В
	Ризик пошкоджень фасаду	Н	Н	С	С	В	В	С
То	Експлуатаційні ризики	Низькі (Н)			Середні (С)		Високі (В)	

ДОДАТОК Г

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

– матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що внесені до переліку фахових для захисту дисертацій з технічних наук:

1. Лялюк А. О., Панкевич В. В., Ратушняк О. Г., Лялюк О. Г. Управління факторами, які впливають на вибір фінансового механізму енергозберігаючого проекту. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2018. Т.24. № 1. С. 94 –100. URL: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/607077>.

2. Ратушняк Г. С., Лялюк А. О., Бікс Ю. С. Алгоритм реалізації проєкта управління імовірністю теплової відмови теплоізоляційної оболонки будівлі. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2019. № 1. С. 140 – 146. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-1-140-146>

3. Лялюк А. О., Лялюк О. Г. Моделювання системи прийняття конструктивно-технічних рішень вибору енергозберігаючого покриття будівлі. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2019. Т.27. № 2. С. 145–154. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-145-154>.

4. Biks Y., Ratushnyak G., Ratushnyak O., Lyalyuk A. Energy efficiency assessment of heat insulation building products: fuzzy-probabilistic approach. *Architecture, Civil Engineering and Environment*. 2021. Vol. 14(1). P. 59–68. (**Web of Science**, ISSN 1899-0142). URL: <https://doi.org/10.21307/acee-2021-006>

5. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Ратушняк О. Г., Лялюк А. О. Установка для дослідження теплопровідності енергоефективних теплоізоляційних матеріалів рослинного походження. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. т. 28, № 1. 2020. С. 100–107. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-1-100-107>.

6. Ратушняк Г. С., Горюн О. Ю., Лялюк А. О. Моделювання теплопередавання у вузлі примикання віконного блоку до зовнішньої стіни. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Т. 29, № 2. 2020. С. 113–118. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-2-113-118>.

7. Biks Y., Ratushnyak G., Ratushnyak O., Lyalyuk A. Thermal Performance Assessment of wall assemblies: Criteria Importance Theory and AHP approach. *Civil Engineering Journal*. 2022. Vol. 31(2). P. 235–248. (Web of Science). DOI:10.14311/CEJ.2022.02.0018.
8. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Лялюк А. О. Експериментальні дослідження теплопровідності теплоізоляційних матеріалів із мінеральної вати. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Т. 32, № 1. 2022. С. 43–48. URL: doi 10.31649/2311121429-2022-1-43-48.
9. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Лялюк А. О. Організаційно-технологічні чинники впливу на енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Т. 33, № 2, 2022. С. 203–210. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-2-203-210>
10. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Моніторинг та експертно-аналітична оцінка надійності теплоізоляційної оболонки будівель. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2023. Т.34. № 1. С. 140–145. DOI 10.31649/2311-1429-2023-1-140-145
11. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Формалізація та ієрархічна класифікація параметрів впливу на енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2023. Т. 35. № 2. С. 98–103. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-2-98-103>
12. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Ратушняк Д. А., Лялюк А. О. Моделювання системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень з оцінювання енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель з використанням лінгвістичних змінних. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2024. Т.36. № 1. С. 91–95. URL: DOI 10.31649/2311-1429-2024-1-91-95
13. Biks Y., Wan Z., Lyalyuk O., Lyalyuk A. Management model for the construction's waste use in walls manufacturing. *Architecture, Civil Engineering and Environment*. 2024. Vol. 17(2). P. 87–99. (Web of Science, ISSN 1899-0142). URL: <https://doi.org/10.2478/acee-2024-0015>

14. Дудар І. Н., Опря Є. М., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Оцінка стану організаційно-технологічних рішень у сфері облаштування, експлуатації та термомодернізації покриттів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2024. Т.37. № 2. С. 181–192. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-2-181-192>.

15. Ратушняк Г. С. Лялюк А. О. Експертне оцінювання енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель нечіткими множинами та лінгвістичними змінними. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. Київ, 2025. Вип. 52. С. 85–96. URL: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.52.85-96>.

16. Лялюк А. О. Планування багатофакторного експерименту при дослідженні впливу вологовмісту теплоізоляційного матеріалу на його теплопровідність. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2025. Т.39. № 2. С. 149–155. DOI <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2025-2-149-155>.

Документи інтелектуальної власності, що отримані за результатами дисертації:

- патент на корисну модель:

17. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Лялюк А. О. Зовнішній стіновий теплозвукоізоляційний блок: МПК Е04С 2/10. пат. 121651 Україна; заявл. 26.06.2017; опубл. 11.12.2017. Бюл. №23.

18. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Лялюк А. О. Каркасна стінова панель із теплозвукоізоляційних солом'яних блоків: Е04В 2/00, Е04В 1/74, Е04С 2/00. пат. 127505 Україна; заявл. 15.02.2018; опубл. 10.08.2018. Бюл. № 15.

19. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Коц І. В., Лялюк А. О. Установка для виготовлення солом'яних блоків заданої щільності та геометричних розмірів: пат. 128148 Україна; заявл. 26.03.2018; опубл. 10.09.2018. Бюл. № 17.

20. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Тітко О. В., Лялюк А. О. Багатошаровий теплоізоляційний стіновий блок: Е04С 1/40, Е04В 2/00. пат. 130548 Україна; заявл. 11.06.2018; опубл. 10.12.2018. Бюл. № 23.

21. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Ратушняк О. Г., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Світлопрозора огорожувальна конструкція: пат. 154989 UA, № у 202302044; заявл. 01.05.2023; опубл. 10.01.2024, Бюл. № 2. – 4 с. : кресл.

22. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Ратушняк О. Г., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Світлопрозора огорожувальна конструкція: пат. 157760 UA, № у 202401845; заявл. 10.04.2024; опубл. 21.11.2024, Бюл. № 47. – 3 с. : кресл.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

23. Лялюк А. О., Лялюк О. Г. Шляхи забезпечення зростання фінансування інновацій в будівництві: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Енергоефективність в галузях економіки України». (м. Вінниця, 5 жовт. 2017.). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2017/paper/viewFile/3397/2847>

24. Лялюк А. О., Лялюк О. Г. Класифікація факторів впливу на вибір фінансового механізму енергозберігаючого проекту: матеріали XLVII наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ. (м. Вінниця, черв. 2018.). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/index/pages/view/zbirn2018>

25. Лялюк А. О., Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С. Моделювання теплопередачі через зовнішній багатошаровий солом'яний стіновий блок. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2018. Т.24. № 1. С. 50–55. URL: <https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/555/535>.

26. Ратушняк О. Г., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Управління фінансовими механізмами з реалізації енергозберігаючих проектів: колект. монографія «Соціально-економічні засади формування та функціонування економіки України» за заг. ред. О. О. Непочатенко, д.е.н., проф. Умань: Видавець Сочінський М. М., 2019. 276 с. (С. 75 – 80). ISBN 978-966-304-287-9

27. Лялюк А. О., Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С. Моделювання теплотехнічних параметрів багатошарових огорожувальних конструкцій із теплоізоляційних матеріалів органічного походження: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в будівництві». (м. Вінниця, листопад 2018). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-ebmd/itb2018/paper/view/6142/5121>

28. Лялюк А. О., Лялюк О.Г. Оцінка ризиків енергозберігаючого проекту: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в будівництві». (м.Вінниця, листопад 2018). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2018/paper/viewFile/5973/4952>
29. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Ущільнення матеріалів рослинного походження при виготовленні теплоізоляційних будівельних матеріалів: матеріали XLVIII наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ. (м. Вінниця, черв. 2019.). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2019/paper/view/7050/5726>
30. Лялюк А. О., Лялюк О. Г. Застосування екомаркетингу в будівництві: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. «Енергоефективність в галузях економіки України». (м.Вінниця, листопад 2019). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egcu/egcu2019/paper/view/8255>.
31. Лялюк А. О., Бікс Ю. С. Використання методик багатокритеріального аналізу в галузі енергоефективності: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в будівництві». (м.Вінниця, листопад 2020). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2020/paper/view/10794>.
32. Бікс Ю. С., Ратушняк О. Г., Лялюк А. О. Комплексна оцінка потенціалу енергоефективності багат шарових огорожувальних конструкцій стін: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Енергозбереження в будівництві». (м. Вінниця, 24 лист. 2021.). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egcu/egcu2021/paper/viewFile/14065/11907>
33. Дудар І. Н., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Шляхи утеплення складних поверхонь: матеріали 51-ї наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ. (м.Вінниця, берез. 2022.). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2022/paper/view/15266>.
34. Ратушняк Г. С., Гончарук В. С., Лялюк А. О. Енергетична ефективність теплозахисту огорожувальних конструкцій будівель: матеріали 51-ї наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ. (м. Вінниця, берез. 2022). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2022/paper/view/14866>.

35. Zhang H., Lyalyuk O., Lyalyuk A. The use of modern materials in the construction of external walls of energy-efficient buildings: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в будівництві». (м. Вінниця, 23 листоп. 2022). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2022/paper/view/16682>.

36. Бікс Ю. С., Ратушняк Г. С., Лялюк А. О. Методи моделювання організаційно-технологічного забезпечення рішень з удосконалення теплоізоляційної оболонки будівель: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в будівництві». (м. Вінниця, листопад 2022). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2022/paper/viewFile/16617/13847>.

37. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Інформаційне забезпечення моделювання теплотехнічних параметрів огорожувальних конструкцій з використанням методів багатокритеріального аналізу: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. «Енергоефективність в галузях економіки України-2023». (м. Вінниця, 23 листоп. 2023). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2023/paper/view/19050>

38. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Моделювання енергетичної ефективності огорожувальних конструкцій будівель з використанням функцій належності: матеріали 53-ї наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ. (м. Вінниця, берез. 2024). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2024/paper/view/20439/16916>

39. Лялюк О. Г., Опря Є. М., Лялюк А. О. Сучасний стан і проблеми, пов'язані з процесом улаштування енергозберігаючого покриття будівлі та шляхи їх вирішення: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Енергоефективність в галузях економіки України-2024». (м. Вінниця, 20 листоп. 2024). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2024/paper/viewFile/22636/18691>.

40. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Функції належності нечітких оцінок впливу визначальних параметрів на прогнозовану енергоефективність огорожувальних конструкцій будівель: матеріали V-ї міжнар. наук.-практ. конф. «Енергія. Ресурси. Екологія – багатофункціональні еко- та енергоефективні, ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях». (м.

Київ, 27–29 листоп. 2024). Київ. 2024. С. 31–32. URL: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/ere-2024-ua.pdf>.

41. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Дослідження теплопровідності теплоізоляційного матеріалу з врахуванням вологовмісту: матеріали III Всеукр. наук. конф. здобувачів освіти і молодих учених. «Відбудова транспортної інфраструктури України». (м. Київ, 2025). С. 72. ISBN: 978-966-632-331-9 URL: https://drive.google.com/file/d/1rYmW-l8i9qIM0yGFqKIntPD0SmWiq_iI/view

42. Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С., Лялюк А. О. Дослідження впливу вологовмісту теплоізоляційного матеріалу на його теплопровідність: матеріали LIV Всеукр. наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ (м.Вінниця, березень 2025). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2025/paper/view/23693/19568>.

43. Опря Є. М., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Optimization of thermal modernization technologies for building coverings to improve energy efficiency and thermal insulation properties: матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф. *Future of Science: Innovations and Perspectives* . (Стокгольм (Швеція), 21–23 квітня 2025). С. 119–123. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2025/04/FUTURE-OF-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PERSPECTIVES-21-23.04.25.pdf>.

44. Лялюк О. Г., Опря Є. М., Лялюк А. О. Удосконалення теплоізоляційних властивостей енергозберігаючого покриття будівлі. Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи. ВНТУ. (м.Вінниця. 2025). URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/schedConf/presentations?track=948>

45. Опря Є. М., Лялюк О. Г., Лялюк А. О. Аналіз фізичних та математичних моделей організаційно-технологічного забезпечення рішень з удосконалення теплоізоляційних властивостей енергозберігаючого покриття будівлі: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Енергоефективність в галузях економіки України-2025». (м. Вінниця, 20 лист. 2025). С. 225–228. ISBN: 978-617-8163-73-0; URL: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/939/1636/2956-1>.

ДОДАТОК Д – АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ У ВИРОБНИЧИЙ ПРОЦЕС



**ПОДІЛЬСЬКИЙ
ПРОЕКТНИЙ ІНСТИТУТ**

ТОВ «Подільський проектний інститут»
вул. Д. Нечая, 65, м. Вінниця, 21012

Тел. +380674308317, +380963264670
E-mail: office@ppi.vn.ua
http://www.ppi.vn.ua

Вих. № 04 від 04.03.26 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор
ТОВ «Подільський проектний інститут»
Василь ЧУБАТЮК
2026 р.

АКТ впровадження результатів дисертаційної роботи Лялюка Андрія Олександровича у практичну діяльність ТОВ «Подільський проектний інститут»

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи Лялюка А. О. на тему: «Управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій будівель» впроваджені у діяльність підприємства ТОВ «Подільський проектний інститут».

Створена експертно-аналітична модель підтримки управлінських рішень у сфері підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій забезпечує комплексне врахування технічних, енергетичних, економічних та експлуатаційних параметрів будівель. Модель інтегрує результати експериментальних досліджень теплофізичних характеристик матеріалів, дані математичного моделювання та експертні оцінки в єдине інформаційно-аналітичне середовище, що дозволяє формувати обґрунтовані проектні та управлінські рішення.

Практичне застосування розробленої моделі сприяє оптимізації конструктивно-технічних рішень щодо влаштування та термомодернізації огорожувальних конструкцій, підвищенню рівня енергоефективності будівель, зниженню експлуатаційних витрат і покращенню якості проектування та реалізації будівельних проектів.

Начальник відділу

Дмитро ШТОВБА

ДОДАТОК Е – АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ В ОСВІТНІЙ ПРОЦЕС

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з науково-педагогічної роботи та організації освітнього процесу

Вінницького національного технічного університету

2026 р.

Олександр ПЕТРОВ

АКТ

про впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи
Лялюка Андрія Олександровича
на тему: «Управління процесами підвищення енергоефективності
огороджувальних конструкцій будівель»

Члени комісії у складі: зав. кафедрою будівництва, міського господарства та архітектури к. т. н., доцента Швеця В.В., заступника декана з навчальної роботи і соціальних комунікацій, к. т. н., доцента Христича О.В., заступника декана з навчально-методичної роботи, к. т. н., доцента Блащук Н.В., склали цей акт про підтвердження того, що результати дисертаційних досліджень аспіранта Лялюка А. О. впроваджено у навчальний процес (лекції, практичні заняття) за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія», а саме:

- ієрархічна система моделей управління процесами підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій, яка поєднує організаційно-управлінські параметри, технічні рішення та теплоенергетичні показники будівель (для підготовки бакалаврів - дисципліна «Енергозберігаючі будівлі та споруди»);

- інноваційні енергоощадні конструктивно-технічні рішення при влаштуванні та термомодернізації непрозорих і світлопрозорих огорожувальних конструкцій будівель (для підготовки магістрів - дисципліна «Інноваційні будівельні технології»);

- методологія оцінювання та ідентифікації кількісної оцінки ключових чинників, що впливають на ефективність управління процесами підвищення енергоефективності будівель (для підготовки бакалаврів - дисципліна «Енергоефективність будівель та споруд»).

Результати впровадження у навчальний процес матеріалів дисертаційного дослідження забезпечують підвищення ефективності навчання здобувачів, а також якості підготовки фахівців з будівництва та цивільної інженерії.

Голова комісії

Члени комісії

Віталій Швець

Наталя Блащук

Олександр Христич