

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МОРОЗ МАРИНА ВІКТОРІВНА

УДК 536.24:536.33:697.133

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОСОБЛИВОСТІ ТЕПЛОПЕРЕНОСЕННЯ ЧЕРЕЗ ТЕПЛОІЗОЛЬОВАНУ
СТІНОВУ ОГОРОДЖУВАЛЬНУ КОНСТРУКЦІЮ**

144 – Теплоенергетика

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

Марина МОРОЗ

Науковий керівник

Басок Борис Іванович, член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук,
професор

Давиденко Борис Вікторович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Мороз М.В. Особливості теплоперенесення через теплоізольовану стінову огорожувальну конструкцію. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 14 електрична інженерія за 144 – Теплоенергетика. – Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена теоретичному та експериментальному дослідженню процесів аеродинаміки та теплоперенесення через теплоізольовані стінові огорожувальні конструкції будівель з урахуванням реальних умов експлуатації. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення енергоефективності будівельного фонду та зниження втрат теплової енергії через зовнішні огорожувальні конструкції.

У роботі проведено аналіз сучасного стану досліджень теплоперенесення через багат шарові стінові конструкції, а також нормативних вимог до теплозахисту будівель. Розглянуто вплив зовнішніх кліматичних факторів, вологості, інсоляції та тривалості експлуатації теплоізоляційних матеріалів на їх теплофізичні характеристики.

Дослідження проведено з використанням раніше розробленого експериментального вимірювального комплексу для дослідження температурних полів і густини теплового потоку на поверхнях теплоізольованих огорожувальних конструкцій будівель. Проведено натурні та лабораторні дослідження теплопередачі через стінові конструкції з різними видами теплоізоляційних матеріалів. Отримано експериментальні дані щодо зміни теплотехнічних характеристик теплоізоляційних матеріалів у процесі довготривалої експлуатації в реальних кліматичних умовах.

На основі експериментальних досліджень визначено закономірності зміни температурних полів та теплових потоків у багат шарових огорожувальних конструкціях, а також оцінено вплив вологості, сонячної радіації та терміну експлуатації теплоізоляції на теплотехнічні характеристики стін. Показано, що деградація теплоізоляційних матеріалів у процесі експлуатації може суттєво

впливати на тепловтрати будівель і повинна враховуватися при інженерних розрахунках.

Отримані результати дозволили уточнити методи оцінювання теплозахисних характеристик стінових конструкцій та сформувані практичні рекомендації щодо вибору теплоізоляційних матеріалів і конструктивних рішень під час термомодернізації будівель.

Зміст дисертаційного дослідження викладено у шести розділах, у яких представлені та обґрунтовані основні результати роботи.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання досліджень, наведено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, визначено особистий внесок здобувача, представлено інформацію щодо апробації, структури і обсягу дисертації.

У *першому розділі* проведено аналіз сучасного стану досліджень у галузі будівельної теплофізики та енергоефективності будівель. Розглянуто основні механізми теплопередачі, вплив кліматичних факторів, а також проаналізовано нормативні вимоги до теплозахисту та сучасні теплоізоляційні матеріали.

У *другому розділі* досліджено конструктивні особливості теплоізольованих стінових огорожувальних конструкцій та проведено аналіз сучасних теплоізоляційних матеріалів. Розглянуто принципи формування теплозахисних характеристик огорожувальних конструкцій і визначено основні вимоги до їх енергоефективності. Також проаналізовано сучасні системи утеплення фасадів та їх експлуатаційні особливості.

У *третьому розділі* розроблено математичну модель тепломасопереносу в капілярно-пористих будівельних матеріалах. Проведено чисельне моделювання температурно-вологісного стану огорожувальних конструкцій з урахуванням впливу зовнішніх кліматичних факторів. Отримано розподіли температури та вологовмісту по товщині стінових конструкцій, що дозволило оцінити їх теплотехнічну ефективність у різних умовах експлуатації.

У *четвертому розділі* представлено результати експериментальних досліджень теплопередачі через стінові конструкції. Проведено лабораторні та

натурні експерименти, а також виконано аналіз зміни теплофізичних характеристик теплоізоляційних матеріалів у процесі експлуатації. Проведено оцінку впливу експлуатаційних факторів на зміну теплопровідності теплоізоляційних матеріалів.

У *п'ятому розділі* досліджено вплив архітектурних та аеродинамічних характеристик будівель на інтенсивність теплових втрат фасадів, а також виконано чисельне моделювання вітрових потоків у зоні міської забудови. Проаналізовано роль геометрії споруд, орієнтації фасадів, щільності забудови та властивостей огорожувальних конструкцій у формуванні теплових потоків і коефіцієнтів тепловіддачі. На основі експериментальних даних встановлено взаємозв'язок між пульсаціями швидкості вітру та коливаннями густини теплового потоку, що дозволило уточнити закономірності теплообміну на зовнішніх поверхнях будівель. Проведено розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі з використанням емпіричних залежностей та визначено їх зміну залежно від швидкості і напрямку вітру. Розроблено тривимірну CFD-модель обтікання комплексу будівель у приземному шарі атмосфери, що базується на розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса з використанням $k-\epsilon$ моделі турбулентності. У результаті моделювання отримано поля швидкостей, тисків і енергетичних характеристик вітрового потоку, які використано для визначення граничних умов у задачах тепlopостачання, вентиляції та оптимального розміщення вітроенергетичних установок у міських умовах.

У *шостому розділі* розроблено практичні рекомендації щодо підвищення енергоефективності стінових конструкцій, обґрунтовано вибір оптимальної товщини теплоізоляційного шару та оцінено економічну ефективність термомодернізації будівель.

У *загальних висновках* подано основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- отримано експериментальні залежності зміни температурних полів та густини теплового потоку в теплоізольованих стінових огорожувальних конструкціях будівель у реальних умовах довготривалої експлуатації;

- вперше встановлено закономірності зміни теплофізичних характеристик теплоізоляційних матеріалів у процесі їх довготривалої експлуатації під впливом кліматичних факторів;

- удосконалено методичний підхід до оцінювання теплотехнічних характеристик стінових огорожувальних конструкцій з урахуванням впливу експлуатаційних факторів та зміни теплофізичних властивостей теплоізоляційних матеріалів;

- набули подальшого розвитку наукові положення щодо впливу зовнішніх кліматичних факторів (температури зовнішнього повітря, швидкості вітру, інсоляції та вологості) на тепловий режим теплоізольованих огорожувальних конструкцій будівель;

- набули подальшого розвитку експериментальні дослідження теплоперенесення через багат шарові стінові конструкції будівель;

- вперше визначено вплив тривалості експлуатації на зміну теплотехнічних характеристик теплоізоляційних матеріалів, що необхідно враховувати під час інженерних розрахунків теплової оболонки;

- удосконалено метод оцінки впливу старіння теплоізоляції на теплотехнічні характеристики, що дозволяє більш точно проводити техніко-економічні розрахунки при виборі типів теплоізоляційних матеріалів.

Практичне значення результатів роботи

Запропоновані підходи до розрахунку тепловтрат дозволяють суттєво вдосконалити існуючі методики будівельної теплотехніки. Практичне значення результатів дисертаційної роботи підтверджується їх впровадженням у звіти відділу теплофізичних основ енергоощадних технологій ІТТФ НАН України. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні енергоефективних будівель і споруд, для уточнення інженерних розрахунків тепловтрат через зовнішні огорожувальні конструкції, під час вибору ефективних

теплоізоляційних матеріалів і конструктивних рішень, а також при розробленні рекомендацій щодо підвищення енергоефективності будівель. Результати дослідження можуть бути впроваджені в діяльність проєктних організацій, науково-дослідних установ і використані в навчальному процесі закладів вищої освіти.

Ключові слова: теплоперенесення, теплоізоляція, огороджувальні конструкції, тепловтрати, енергоефективність будівель, тепловий потік, температурне поле, термомодернізація, CFD, чисельне моделювання, теплопередача, відновлювальні джерела енергії, тепловий пункт, пасивний будинок, енергоефективні вікна.

ANNOTATION

Moroz M.V. Features of Heat Transfer through an Insulated Wall Building Envelope Structure. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for obtaining the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 14 Electrical Engineering, specialty 144 – Heat Power Engineering. – Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the theoretical and experimental study of aerodynamic and heat transfer processes in thermally insulated building envelope structures, taking into account real operating conditions. The relevance of the study is due to the need to improve the energy efficiency of the building stock and to reduce heat losses through external enclosing structures.

The study analyzes the current state of research on heat transfer through multilayer wall structures, as well as regulatory requirements for the thermal protection of buildings. The influence of external climatic factors, humidity, solar radiation, and the service life of thermal insulation materials on their thermophysical properties is considered.

The research was carried out using a previously developed experimental measurement system for studying temperature fields and heat flux density on the surfaces of thermally insulated building envelopes. Field and laboratory studies of heat transfer through wall structures with different types of thermal insulation materials were conducted. Experimental data on changes in the thermal characteristics of thermal insulation materials during long-term operation under real climatic conditions were obtained.

Based on the experimental studies, the regularities of temperature fields and heat fluxes in multilayer enclosing structures were determined, and the influence of humidity, solar radiation, and service life on the thermal characteristics of walls was assessed. It was shown that the degradation of thermal insulation materials during operation can significantly affect building heat losses and should be taken into account in engineering calculations.

The results obtained made it possible to refine the methods for assessing the thermal insulation performance of wall structures and to develop practical recommendations for the selection of thermal insulation materials and design solutions during the thermal modernization of buildings.

The dissertation consists of six chapters presenting and substantiating the main results of the study.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, defines the aim and objectives of the research, presents the scientific novelty and practical significance of the results obtained, determines the personal contribution of the author, and provides information on the approbation, structure, and scope of the dissertation.

The *first chapter* analyzes the current state of research in the field of building thermal physics and the energy efficiency of buildings. The main heat transfer mechanisms and the influence of climatic factors are considered, and the regulatory requirements for thermal protection and modern thermal insulation materials are analyzed.

The *second chapter* examines the design features of thermally insulated wall enclosing structures and analyzes modern thermal insulation materials. The principles of forming the thermal protection characteristics of enclosing structures are considered, and the main requirements for their energy efficiency are determined. Modern facade insulation systems and their operational features are also analyzed.

The *third chapter* presents a mathematical model of heat and mass transfer in capillary-porous building materials. Numerical modeling of the temperature and humidity state of enclosing structures was carried out, taking into account the influence of external climatic factors. Distributions of temperature and moisture content across the thickness of wall structures were obtained, which made it possible to assess their thermal performance under various operating conditions.

The *fourth chapter* presents the results of experimental studies of heat transfer through wall structures. Laboratory and field experiments were conducted, and changes in the thermophysical characteristics of thermal insulation materials during operation

were analyzed. The influence of operational factors on the thermal conductivity of thermal insulation materials was assessed.

The *fifth chapter* investigated the influence of architectural and aerodynamic characteristics of buildings on the intensity of heat loss of facades, and numerical modeling of wind flows in the urban development zone was performed. The role of the geometry of structures, facade orientation, building density, and properties of enclosing structures in the formation of heat flows and heat transfer coefficients was analyzed. Based on experimental data, a relationship was established between wind speed pulsations and heat flux density fluctuations, which allowed us to clarify the regularities of heat transfer on the external surfaces of buildings. Heat transfer coefficients were calculated using empirical dependencies and their change depending on wind speed and direction was determined. A three-dimensional CFD model of the flow around a building complex in the surface layer of the atmosphere was developed, based on the solution of the Navier-Stokes equations using the $k-\varepsilon$ turbulence model. As a result of the modeling, fields of velocity, pressure and energy characteristics of the wind flow were obtained, which were used to determine the boundary conditions in the problems of heat supply, ventilation and optimal placement of wind power plants in urban conditions.

The *sixth chapter* provides practical recommendations for improving the energy efficiency of wall structures, justifies the optimal insulation thickness, and evaluates the economic efficiency of building thermal modernization.

The general conclusions present the main scientific and practical results of the dissertation research.

The scientific novelty of the results of the dissertation research is as follows:

- experimental dependences of changes in temperature fields and heat flux density in thermally insulated wall enclosing structures of buildings under real conditions of long-term operation were obtained;
- for the first time, regularities of changes in the thermophysical characteristics of thermal insulation materials during their long-term operation under the influence of climatic factors were established;

- a methodological approach to assessing the thermal characteristics of wall enclosing structures was improved, taking into account the influence of operational factors and changes in the thermophysical properties of thermal insulation materials;
- scientific provisions on the influence of external climatic factors (outdoor air temperature, wind speed, insolation and humidity) on the thermal regime of thermally insulated building enclosing structures were further developed;
- experimental studies of heat transfer through multilayer wall structures of buildings were further developed;
- for the first time, the influence of the duration of operation on the change in the thermal characteristics of thermal insulation materials was determined, which must be taken into account during engineering calculations of the thermal envelope;
- the method of assessing the impact of thermal insulation aging on thermal characteristics has been improved, which allows more accurate technical and economic calculations when choosing types of thermal insulation materials.

Practical significance of the results of the work. The proposed approaches to calculating heat losses allow to significantly improve the existing methods of building thermal engineering. The practical significance of the results of the dissertation work is confirmed by their implementation in the reports of the Department of Thermophysical Fundamentals of Energy-Saving Technologies of the Institute of Thermal Physics and Thermal Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine. The results obtained can be used in the design of energy-efficient buildings and structures, to clarify engineering calculations of heat losses through external enclosing structures, when choosing effective thermal insulation materials and structural solutions, as well as in the development of recommendations for increasing the energy efficiency of buildings. The results of the study can be implemented in the activities of design organizations, research institutions and used in the educational process of higher education institutions.

Keywords: *heat transfer, thermal insulation, building envelope, heat loss, energy efficiency of buildings, heat flow, temperature field, thermal modernization, CFD, numerical modeling, heat transfer, renewable energy sources, heat point, passive house, energy-efficient windows.*

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧКИ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Basok B., Pavlenko A., Novikov V., Koshlak H., Ciosek A., Moroz M. Comprehensive Investigation of the Thermal Performance of an Electrically Heated Double-Glazed Window: A Theoretical and Experimental Approach. *Energies*. 2024. Vol. 17 (17). DOI: <https://doi.org/10.3390/en17174491> [іноземне видання; **Scopus Q1**] (*Внесок здобувача: участь у проведенні огляду та аналізу літературних джерел, постановці завдань дослідження*).

2. Boris Basok, Anatoliy Pavlenko, Oleksandr Nedbailo, Ihor Bozhko, Maryna Moroz A Two-dimensional Numerical Model of Heat Exchange in the Soil Massif During the Operation of a Shallow Horizontal Soil Heat Exchanger. *Rocznik Ochrona Środowiska*, Volume 25, 2023. pp. 274 – 281. DOI: 10.54740/ros.2023.029 [іноземне видання; **Scopus Q3**] (*Внесок здобувача: участь у проведенні огляду та аналізу літературних джерел, постановці завдань дослідження*).

3. Basok, B., Dubovsky, S., Pastushenko, E., Moroz, M., & Veremiichuk, H. (2023). ACTIVE UTILIZATION OF THE HEAT OF THE FLUE GASES OF THE BIOFUEL BOILER. *Energy Technologies & Resource Saving*, 77(4), 67-80. <https://doi.org/10.33070/etars.4.2023.06> [вітчизняне фахове видання; **категорія «А»**, **Scopus Q4**] (*Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних*).

4. Borys Basok, Svitlana Goncharuk, Maryna Moroz, Hanna Veremiichuk. EXPERIMENTAL RESEARCH OF HEAT TRANSFER THROUGH HEAT-INSULATED WALL ENCLOSURE STRUCTURES. *Journal of new technologies in environmental science*. № 3. Vol. 7. 2023. P. 77-82. Doi: 10.53412/jntes-2023-3-1 [іноземне видання]. (*Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації*).

5. Basok, M. Novitska, S. Goncharuk, M. Moroz, A. Timoshenko. Experimental passive house of the institute of engineering thermophysics//Proceedings of IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems. April 17-19. 2019. Kyiv, Ukraine.

P.108-111. [іноземне видання; **Scopus**]. (*Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації*)

6. Basok B., Davydenko B., Lysenko O., Goncharuk S., Veremiichuk Yu., Moroz M. Intelligent management of the building's heat consumption when using individual heat points. 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems. [іноземне видання; **Scopus**] (*Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації*).

7. Тимощенко А.В., Беляєва Т.Г., Стецюк В.Г., Сороковий Р.Я., Мороз М.В. (2018). Конвективна сушка теплоізоляційних базальто-бентонітових виробів. Енергетика: економіка, технології, екологія, (3), с. 103-110. [вітчизняне фахове видання; **категорія «Б»**] (*Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації*).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Basok B., Goncharuk S., Opryshko V., Lysenko O., Bospala N. Moroz M. Experimental determination of thermal parameters of an electric heater. IEEE 9th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). October 29-31. 2024.

9. Мороз М.В., Басок Б.І. Експериментальні дослідження температурного стану приміщення при різних варіантах термоізоляційних фасадних матеріалів. – Енергетика. Екологія. Людина. Зб. наукових праць ІЕЕ, КПІ імені Ігоря Сікорського – Київ: ІЕЕ, 2020. – С.261-269.

10. Basok B., Davydenko D., Novikov V., Sorokoviy R., Moroz M., Timoshchenko A. Influence of Solar Radiation on the Temperature Regime of Buildings Walls. Technical University of Kosice. Civil Engineering faculty – ISBN 978-80-553-3238-3 – p. 100. – p.70-76 Cassotherm 2018.

11. Мороз М.В. Аналіз технологічних рішень утеплення фасадів будинків, Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: Збірка праць/Інститут промислової екології. – К.: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2021. С. 174-177.

12. Б.І. Басок, О.М. Лисенко, С.В. Андрейчук, М.П. Коваленко, В.П. Приємченко, М.В. Мороз. Економія витрат теплової енергії при експлуатації

індивідуального теплового пункту. Збірник праць «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики». Київ ІВЦ АЛКОН НАН України. 2022, С. 224-227.

13. Басок Б.І., Мороз М.В. «Застосування резервних генераторів для забезпечення безперервної роботи індивідуальних теплових пунктів: технічні аспекти та експлуатаційні вимоги». XIV Міжнародна онлайн-конференція «Проблеми теплофізики та теплоенергетики», 11-12 листопада 2025р.

14. Басок Б.І., Мороз М.В. «Організація аварійного (резервного) теплопостачання для закладів соціальної сфери міста Києва». V Міжнародна науково-практична конференція «Енергія. Ресурси. Екологія», 03-05 грудня 2025р.

15. Мороз М. В. Експериментальні дослідження температурного та вологісного стану приміщення при різних варіантах термоізоляційних матеріалів / М. В. Мороз, Б. І. Басок // Актуальні проблеми енергетики та екології: збірник наукових праць за матеріалами XVIII Всеукраїнської науково-технічної онлайн-конференції, Одеса, 29-30 вересня 2020 р./ ред. О. С. Тітлов. – Одеса : Бондаренко М. О., 2020. – С. 128–129.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	16
ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛОПЕРЕНЕСЕННЯ ЧЕРЕЗ ТЕПЛОІЗОЛЬОВАНІ СТІНОВІ КОНСТРУКЦІЇ	
1.1. Основні поняття та механізми теплопередачі	22
1.2. Роль енергоефективності в житлово-комунальному господарстві.....	26
1.3. Аналіз будівельних норм і стандартів щодо теплового захисту.....	30
1.4. Вплив факторів зовнішнього середовища на теплопередачу.....	35
1.5. Сучасні тенденції та напрями досліджень	43
Висновки до розділу.....	46
РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ТЕПЛОІЗОЛЬОВАНИХ СТІНОВИХ КОНСТРУКЦІЙ	
2.1. Загальні принципи теплозахисту будівель.....	48
2.2. Класифікація теплоізольованих стінових конструкцій за розташуванням теплоізоляційного шару	50
2.3. Класифікація теплоізольованих стінових конструкцій за видом теплоізоляційного матеріалу.....	54
2.4. Аналіз ринку теплоізоляційних матеріалів України.....	66
2.5. Конструктивні рішення для підвищення енергоефективності стін.....	71
Висновки до розділу.....	77
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ ТЕПЛОІЗОЛЬОВАНУ СТІНУ	
3.1. Моделі теплопередачі через багат шарові стіни.....	79
3.2. Чисельне моделювання розподілу температур і вологовмісту по товщині огорожувальних конструкцій в залежності від зовнішніх умов та типу теплоізоляційного матеріалу.....	81
3.3. Результати розрахунків полів температури та концентрацій вологи в стіновій конструкції.....	99

3.4	Результати чисельного дослідження температурно-вологого стану огорожувальної конструкції будівлі	104
	Висновки до розділу.....	115
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ СТИНОВІ ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ		
4.1.	Програма та методика експериментальних досліджень	118
4.2	Вимірювальний комплекс.....	125
4.3.	Експериментальне визначення температурного і вологісного стану огорожувальних конструкцій в залежності від зовнішніх умов та типу теплоізоляційного матеріалу.....	129
4.4.	Порівняльний аналіз експериментальних та розрахункових результатів по визначенню вологості стінової конструкції	145
	Висновки до розділу.....	147
РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ УМОВ НА ТЕРИТОРІЇ ЗАБУДОВИ		
5.1	Вплив архітектурних характеристик будівель на інтенсивність теплових втрат їхніх фасадів.....	149
5.2	Чисельне моделювання вітрових потоків в зоні міської забудови	154
5.3	Аеродинамічна модель потоків вітру в зоні міської забудови	168
	Висновки до розділу	181
РОЗДІЛ 6. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СТИНОВИХ КОНСТРУКЦІЙ		
6.1	Вибір оптимальної товщини шару утеплювача на зовнішній поверхні огорожувальних конструкцій будівлі.....	183
6.2	Оцінка економічної ефективності утеплення.....	184
	Висновки до розділу.....	188
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....		190
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....		193
ДОДАТОК.....		201

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Скорочення

ДБН – Державні будівельні норми;
НС – навколишнє середовище;
ОК – огорожувальна конструкція;
ОВС – одинична вимірювальна система;
ППС – пінополістирол;
ПТ – перетворювач температури;
ПТО – платиновий термометр опору;
ПТП – перетворювач теплового потоку;
ТСМ – термометр опору мідний;
CFD – Computational Fluid Dynamics (обчислювальна гідродинаміка) .

Умовні позначення

R , м² К/Вт – термічний опір;
 Q , Вт – тепловий потік;
 Δ – різниця;
 q , Вт/м² – густина теплового потоку;
 T , К – абсолютна температура;
 t , °С – температура;
 α , Вт/(м²·К) – коефіцієнт тепловіддачі;
 λ , Вт/(м·К) – коефіцієнт теплопровідності;
 ν , м²/с – кінематичний коефіцієнт в'язкості;
 μ , Па·с – динамічний коефіцієнт в'язкості;
 ρ , кг/м³ – густина.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Підвищення енергоефективності будівель є одним із пріоритетних напрямів розвитку сучасної енергетики та будівельної галузі. Значна частина споживання енергетичних ресурсів припадає на забезпечення комфортного мікроклімату у будівлях, зокрема на опалення та вентиляцію. У структурі тепловтрат будівель істотну частку становлять втрати тепла через зовнішні огорожувальні конструкції, насамперед через стінові конструкції, які мають найбільшу площу контакту із зовнішнім середовищем.

У сучасних умовах зростання вартості енергоресурсів, посилення вимог до енергетичної ефективності будівель та необхідності зменшення негативного впливу на довкілля проблема зниження тепловтрат через огорожувальні конструкції набуває особливої актуальності.

Сучасні технології термомодернізації передбачають застосування багатошарових стінових конструкцій з використанням різноманітних теплоізоляційних матеріалів. Однак у процесі їх експлуатації теплофізичні властивості матеріалів можуть змінюватися під впливом кліматичних факторів, вологості, температурних коливань та тривалості експлуатації. У результаті фактичні теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій можуть істотно відрізнятись від розрахункових.

Незважаючи на значну кількість досліджень у галузі будівельної теплофізики, питання комплексного аналізу теплоперенесення через теплоізовані стінові конструкції у реальних умовах експлуатації, з урахуванням впливу зовнішніх кліматичних факторів та зміни властивостей теплоізоляційних матеріалів у часі, залишаються недостатньо дослідженими.

У зв'язку з цим дослідження закономірностей теплоперенесення через теплоізовані стінові огорожувальні конструкції будівель є актуальним науковим завданням, що має важливе практичне значення для підвищення енергоефективності будівель.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Робота виконувалась у відділі теплофізичних основ енергоощадних технологій

Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України у рамках науково-дослідних робіт: «Енергомодельовання будівлі з врахуванням її конструктивних особливостей, системи енергозабезпечення, зовнішнього середовища та клімату», Держреєстрація №0115U003364; «Розробка портативного блоку автоматизованих вимірювань теплових характеристик зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель», Держреєстрація №0118U002191; «Теплофізичні основи підвищення ефективності теплоспоживання будівлі» Держреєстрація №0118U006356; «Розроблення науково-технічних засад інтенсифікації тепломасообміну в пористих середовищах для матеріалів будівельних конструкцій та теплоенергетичного обладнання», Держреєстрація №0120U100454; «Аеродинаміка та теплообмін в інноваційних світлопрозорих конструкціях і в тепломасообмінному устаткуванні та їх використання для повоєнного відновлення пошкоджених вибуховою хвилею будівель країни», Держреєстрація № 0125U000979.

Мета роботи. Метою дисертаційної роботи є встановлення закономірностей теплоперенесення через теплоізовані стінові огорожувальні конструкції будівель у реальних умовах експлуатації та оцінювання впливу експлуатаційних і кліматичних факторів на теплофізичні характеристики теплоізоляційних матеріалів з метою підвищення енергоефективності будівель.

Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети вирішенню підлягали такі завдання:

- провести аналіз сучасного стану досліджень теплоперенесення через теплоізовані стінові огорожувальні конструкції будівель;
- проаналізувати нормативні вимоги до теплозахисту будівель та сучасні технології утеплення огорожувальних конструкцій;
- дослідити вплив зовнішніх кліматичних факторів (температури зовнішнього повітря, вологості, швидкості вітру, інсоляції) на тепловий режим стінових конструкцій будівель;

- розробити експериментальний вимірювальний комплекс для дослідження температурних полів та густини теплового потоку на поверхнях теплоізованих огорожувальних конструкцій;

- провести експериментальні дослідження теплопередачі через теплоізовані стінові конструкції в умовах реальної експлуатації будівлі;

- встановити закономірності зміни теплофізичних характеристик теплоізоляційних матеріалів у процесі їх довготривалої експлуатації;

- оцінити вплив експлуатаційних факторів на теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій будівель;

- розробити практичні рекомендації щодо підвищення енергоефективності стінових огорожувальних конструкцій при термомодернізації будівель.

Об'єкт дослідження – тепловий стан приміщень будівлі із різними типами огорожувальних конструкцій.

Предмет дослідження – закономірності теплоперенесення в стінах із різними видами теплоізоляції, їх термічний опір, вплив вологості та інсоляції на теплотехнічні характеристики.

Методи дослідження: бібліографічний пошук, аналітичні, інженерні розрахунки, порівняльний аналіз, експериментальні лабораторні установки і стенди із залученням автоматизованого вимірювального комплексу для подальшої обробки та аналізу експериментальних даних.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі є наслідком використання статистичної обробки результатів, використанням нормованих показників енергоефективності та використання результатів експериментальних досліджень та порівняння отриманих експериментальних даних з результатами інших досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна отриманих у дисертаційній роботі результатів полягає в наступному:

- отримано експериментальні залежності зміни температурних полів та густини теплового потоку в теплоізольованих стінових огорожувальних конструкціях будівель у реальних умовах довготривалої експлуатації;

- вперше встановлено закономірності зміни теплофізичних характеристик теплоізоляційних матеріалів у процесі їх довготривалої експлуатації під впливом кліматичних факторів;

- удосконалено методичний підхід до оцінювання теплотехнічних характеристик стінових огорожувальних конструкцій з урахуванням впливу експлуатаційних факторів та зміни теплофізичних властивостей теплоізоляційних матеріалів;

- набули подальшого розвитку наукові положення щодо впливу зовнішніх кліматичних факторів (температури зовнішнього повітря, швидкості вітру, інсоляції та вологості) на тепловий режим теплоізольованих огорожувальних конструкцій будівель;

- набули подальшого розвитку експериментальні дослідження теплоперенесення через багат шарові стінові конструкції будівель;

- вперше визначено вплив тривалості експлуатації на зміну теплотехнічних характеристик теплоізоляційних матеріалів, що необхідно враховувати під час інженерних розрахунків теплової оболонки;

- удосконалено метод оцінки впливу старіння теплоізоляції на теплотехнічні характеристики, що дозволяє більш точно проводити техніко-економічні розрахунки при виборі типів теплоізоляційних матеріалів.

Практичне значення одержаних результатів:

Запропоновані підходи до розрахунку тепловтрат дозволяють суттєво вдосконалити існуючі методики будівельної теплотехніки. Практичне значення результатів дисертаційної роботи підтверджується їх впровадженням у звіти відділу теплофізичних основ енергоощадних технологій ІТТФ НАН України. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні енергоефективних будівель і споруд, для уточнення інженерних розрахунків тепловтрат через зовнішні огорожувальні конструкції, під час вибору ефективних

теплоізоляційних матеріалів і конструктивних рішень, а також при розробленні рекомендацій щодо підвищення енергоефективності будівель. Результати дослідження можуть бути впроваджені в діяльність проєктних організацій, науково-дослідних установ і використані в навчальному процесі закладів вищої освіти.

Особистий внесок здобувача. Здобувачу належить аналіз стану проблеми, розробка й обґрунтування основних наукових положень дисертації у постановці та вирішенні завдань теоретичного та практичного характеру, виконання експериментальних досліджень та обробка отриманих результатів, формулювання основних наукових положень і висновків роботи.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і матеріали дисертаційної роботи були представлені доповідями на міжнародних науково – практичних конференціях, зокрема: XIV Міжнародній онлайн-конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (Київ, 2025 р.); V Міжнародній науково-практичній конференції «Енергія. Ресурси. Екологія» (Київ, 2025 р.); XVIII Всеукраїнській науково-технічній онлайн-конференції (Одеса, 2020 р.).

Публікації. Результати роботи викладені в 10 публікаціях, в т.ч. 2 статі у наукових фахових видань України за спеціальністю 144 – Теплоенергетика; 5 статей у науковому виданні, яке включено до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science; 2 статті у наукових виданнях України; опубліковано 5 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій, подано заявки та отримано 2 патенти України на винахід.

Обсяг і структура дисертації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, та списку використаних джерел.

Загальний обсяг дисертації становить 203 сторінки друкованого тексту, у тому числі 114 рисунків, 13 таблиць та 1 додаток. Список використаних джерел містить 86 найменувань.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛОПЕРЕНЕСЕННЯ ЧЕРЕЗ ТЕПЛОІЗОЛЬОВАНІ СТІНОВІ КОНСТРУКЦІЇ

1.1. Основні поняття та механізми теплопередачі

Будівля (згідно матеріалів Директиви 2010/31/ЄС «Про енергетичну ефективність будівель») – покрита дахом споруда, що має стіни, енергія в якій використовується для формування клімату в приміщенні [1].

Будівля (за матеріалами Закону України «Про енергетичну ефективність будівель») – різновид наземної споруди, пов'язаної фундаментом із землею (грунтом), що складається з несучих та огорожувальних сполучених (несучо-огорожувальних) конструкцій, які утворюють приміщення, інженерних систем, та в якій використовується енергія з метою створення належних умов проживання та/або життєдіяльності людей [2].

Багат шарова огорожувальна конструкція (за матеріалами ДБН В.2.6-31:2016 «Теплова ізоляція будівель») – огорожувальна конструкція, що складається за своїм перерізом із шарів матеріалу, теплофізичні характеристики яких відрізняються одна від одного не менше ніж на 20 % [3].

Енергетична ефективність будівлі (за матеріалами ДБН В.2.6-31:2016 «Теплова ізоляція будівель») – властивість будівлі, її конструктивних елементів та інженерного обладнання забезпечувати протягом очікуваного життєвого циклу будівлі побутові потреби людини та оптимальні мікрокліматичні умови для її перебування та/або проживання у приміщеннях такої будівлі при нормативно допустимому (оптимальному) рівні витрат енергетичних ресурсів на опалення, освітлення, вентиляцію, кондиціонування повітря, гаряче водопостачання з урахуванням місцевих кліматичних умов [3].

Зовнішні стінові огорожувальні конструкції – сукупність непрозорих огорожувальних конструкцій всього будинку, що створюють фасад та характеризуються спільними ознаками призначення, виконують однакові функції та для яких нормується приведений опір теплопередачі. При цьому зовнішні стінові

огороджувальні конструкції можуть складатись з ділянок, що мають різний конструктивний склад [4].

Інженерні системи (За матеріалами Закону України «Про енергетичну ефективність будівель») – технічне обладнання будівлі, житлових та нежитлових приміщень, призначене для опалення, охолодження кондиціонування, вентиляції, постачання гарячої води, освітлення будівлі чи для поєднання цих функцій [1].

Клас енергетичної ефективності – рівень енергетичної ефективності будинку за інтервалом значень питомої витрати теплової енергії на опалення будинку за опалювальний період.

Коефіцієнт теплозасвоєння матеріалу – коефіцієнт, що визначає величину зміни теплового потоку, що проходить через поверхню матеріалу значної товщини при амплітуді коливання температури цієї поверхні на 1 °С з періодом 24 год.

Коефіцієнт теплостійкості – коефіцієнт, що визначає величину зміни температури у матеріалі при гармонійній зміні температури зовнішнього середовища з періодом 24 год.

Конвекція – перенесення тепла повітряними потоками біля поверхонь конструкцій. Внутрішня конвекція впливає на температуру приміщення, а зовнішня – на теплообмін із довкіллям.

Мікроклімат приміщення – умови внутрішнього середовища приміщення, що впливають на тепловий обмін людини з оточенням шляхом конвекції, кондукції, теплового випромінювання та випаровування вологи; ці умови визначаються поєднанням температури, відносної вологості та швидкості руху повітря, температури оточуючих людину поверхонь та інтенсивністю теплового (інфрачервоного) опромінення

Мікрокліматичні умови (умови мікроклімату):

- **оптимальні** - поєднання параметрів мікроклімату, які при тривалому та систематичному впливі на людину забезпечують зберігання нормального теплового стану організму без активізації механізмів терморегуляції; вони створюють відчуття теплового комфорту та забезпечують передумови для високого рівня працездатності;

- **підвищені оптимальні** - оптимальні мікрокліматичні умови у приміщеннях з дуже чутливими та слабкими людьми з особливими потребами, такими як: інваліди, хворі, маленькі діти та люди похилого віку;

- **допустимі** - поєднання параметрів мікроклімату, які при тривалому та систематичному впливі на людину можуть викликати зміни теплового стану організму, що швидко минають і нормалізуються, але супроводжуються напруженням механізмів терморегуляції в межах фізіологічної адаптації; при цьому не виникає ушкоджень або порушень стану здоров'я, але можуть спостерігатися дискомфортні тепловідчуття, погіршення самопочуття та зниження працездатності;

- **обмежено допустимі** - допустимі мікрокліматичні умови у приміщеннях будівель з обмеженим використанням упродовж року (менше чотирьох місяців підряд упродовж року) [6].

Непрозорі огороджувальні конструкції – конструктивні елементи теплоізоляційної оболонки будівлі (стіни, покриття, перекриття тощо), до складу яких входить один і більше шарів матеріалу, що не пропускають видиме світло.

Огороджувальні конструкції (за матеріалами ДБН В.2.6-31:2016 «Теплова ізоляція будівель») – будівельні конструкції, що створюють теплоізоляційну оболонку для збереження теплоти для опалення та/або охолодження приміщень, захисту від кліматичних впливів, поділу будинку на відокремлені частини або приміщення з різними температурними та вологісними умовами експлуатації.

Розрахункові умови експлуатації – розрахункові температура і вологість внутрішнього повітря, які визначають перенесення тепла і вологи через матеріал при його експлуатації в огороджувальних конструкціях.

Термомодернізація будівель (за матеріалами Закону України «Про енергетичну ефективність будівель») – комплекс робіт, спрямованих на підвищення теплотехнічних показників огороджувальних конструкцій будівель, показників споживання енергетичних ресурсів інженерними системами та забезпечення енергетичної ефективності будівель на рівні не нижчому, ніж встановлено мінімальними вимогами щодо енергетичної ефективності будівель,

що здійснюється під час виконання робіт з реконструкції, капітального чи поточного ремонту будівель або робіт, які не потребують документів, що дають право на їх виконання, та після закінчення яких об'єкт не підлягає прийняттю в експлуатацію.

Теплова оболонка будинку (За матеріалами ДБН В.2.6-31:2016 «Теплова ізоляція будівель») – система огорожувальних конструкцій будинку, що забезпечує збереження теплоти для опалення та/або охолодження приміщень.

Тепловий режим будівлі – сукупність усіх чинників і процесів, що визначають тепловий режим в його приміщеннях.

Теплостійкість приміщень – властивість конструкцій приміщення зберігати нормовану стабільність температури при коливаннях температури навколишнього середовища та теплової енергії на опалення [3].

Технічне обстеження будівлі - процес виявлення фактичного стану, конструктивних параметрів теплоізоляційної оболонки будівлі та її інженерних систем сертифікованими фахівцями з подальшим використанням отриманих результатів при встановленні та оцінюванні показників енергетичної ефективності.

Теплопровідність – кількість теплоти, що передається через одиницю площі (m^2) шару матеріалу за одиницю часу (с) при стаціонарному градієнті температур 1 К.

Теплоємність – властивість матеріалу поглинати або віддавати теплоту при підвищенні або зниженні температури. Питома теплоємність с показує кількість теплоти (Дж), яку необхідно передати або відвести від 1 кг матеріалу, щоб змінити його температуру на $1^{\circ}C$.

Термін ефективної експлуатації (розрахункова довговічність) теплоізоляційних виробів – експлуатаційний період, протягом якого вироби зберігають свої теплоізоляційні властивості на рівні проектних показників, що підтверджується результатами лабораторних випробувань і зазначено в умовних роках експлуатації (терміну служби).

1.2. Роль енергоефективності в житлово-комунальному господарстві

На сучасному етапі розвитку технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності використання енергоносіїв, ключовим фактором енергозбереження в будівлях є рівень економії теплової енергії. В Україні енергозбереження у будівництві є важливою складовою державної політики, спрямованої на зниження енергоспоживання та зменшення негативного впливу будівель на навколишнє середовище. Одним із основних завдань є забезпечення температурного комфорту в приміщеннях без необґрунтованих витрат енергії. Особливу увагу приділяють енергетичній ефективності будівель, розташованих у холодній та помірній кліматичних зонах, оскільки саме для них споживання теплової енергії становить основну частку витрат на енергоресурси.

Житлово-комунальне господарство України й досі залишається однією з найбільш енергоємних та проблемних галузей національної економіки. Аналіз втрат енергії первинного палива показує, що приблизно 30-40% найбільших надлишкових втрат тепла припадає на будівлі, 25% – на зовнішні теплові мережі та 5% – на застаріле обладнання котелень. В енергобалансі України витрата теплової енергії на підтримання функціонування будівель перевищує 25%, а питомі витрати енергоресурсів більш як у 2 рази вищі, ніж у країнах Європи. Для прикладу, в Україні середнє питоме споживання енергії на опалення становить 264 кВт·год/м²·рік, в той час як в країнах ЄС цей показник сягає 130 кВт·год/м²·рік. Структура споживання енергетичних ресурсів в Україні має суттєві відмінності з відповідною структурою у світі в цілому та у промислово розвинутих країнах [5].

В умовах постійного зростання цін на основні види енергоресурсів та значної зовнішньоекономічної залежності нашої країни від постачальників енергоносії в покращення показників енергоефективності та зменшення споживання енергоресурсів у будівлях не виробничого та виробничого призначення набуває особливої актуальності у зв'язку із нагальною необхідністю економії коштів на їх утримання.

Житловий фонд України щороку зростає і станом на 2020 рік становить 1014,8 млн м² загальної площі, з яких 624,9 млн м² припадає на міський житловий фонд.

Водночас його технічний стан поступово погіршується, а обсяги фінансування утримання є недостатніми. Понад 80% житлового фонду є застарілим і не відповідає сучасним вимогам комфортності проживання. Це проявляється у значному зношенні інженерних мереж, покрівель, відсутності приладів обліку теплової енергії, підвищених витратах на опалення, а також у недостатніх теплозахисних характеристиках стінових і світлопрозорих огорожувальних конструкцій, які не забезпечують нормативний рівень комфорту [7].

Втрати теплової енергії будівлею можна розподілити таким чином, як наведено на рис. 1.1 [7].

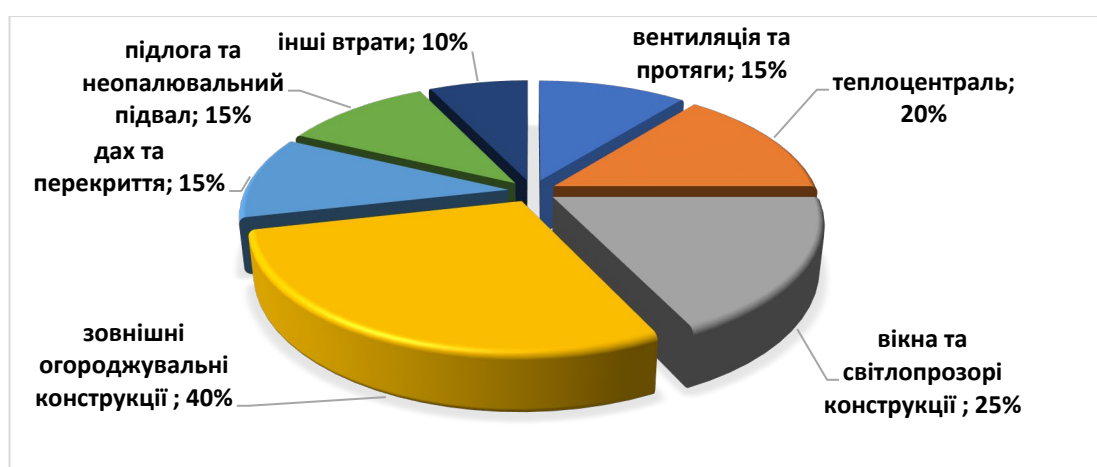


Рис. 1.1 Структура втрат теплової енергії будівлею

Найбільша частка тепловтрат припадає на стіни, а їх теплозахисні властивості відіграють визначальну роль у забезпеченні теплового захисту будівлі. Основним превентивним заходом щодо зменшення втрат тепла є формування герметичної огорожувальної оболонки без містків холоду. У зв'язку з цим дедалі ширше впроваджуються програми енергозбереження, реалізуються відповідні проекти та застосовуються сучасні технології, спрямовані на зниження енергоємності житлових будівель і підвищення енергоефективності систем теплопостачання.

Наведений на рис. 1.2 розподіл житлового фонду свідчить, що близько половини будівель введено в експлуатацію в післявоєнний період та на початковому етапі впровадження індустріального житлового будівництва (до 1970 року) [8].

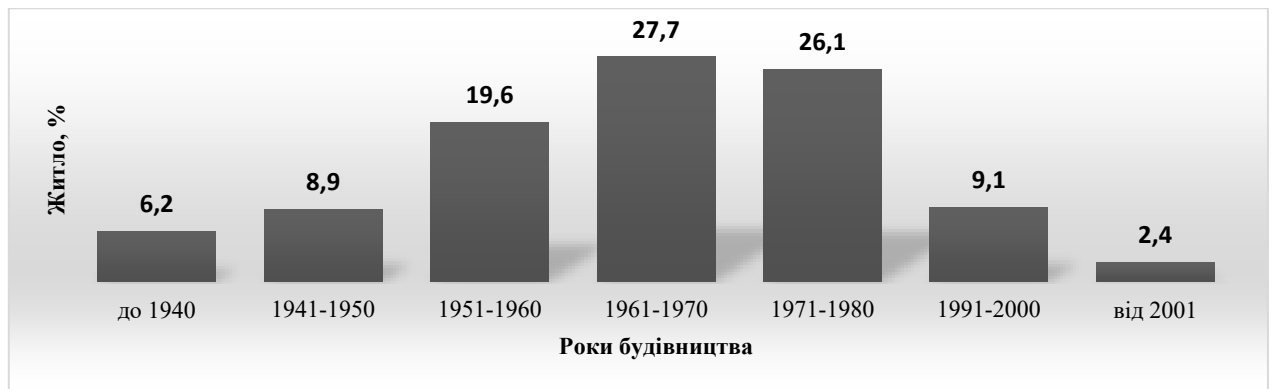


Рис. 1.2 Житловий фонд України

Незважаючи на те, що в будівельних нормах того періоду були передбачені вимоги щодо врахування енергозбереження зовнішніх огорожувальних конструкцій на етапі розроблення проєктної документації, на практиці ці вимоги здебільшого не виконувалися. Однією з причин були низькі ціни на паливо, внаслідок чого окупність капітальних витрат була тривалою та економічно недоцільною.

Розрахунок зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель ґрунтувався переважно на санітарно-гігієнічних вимогах. Унаслідок цього більшість будівель, зведених на території колишньої Радянської України, характеризуються підвищеним рівнем енергоспоживання та значними експлуатаційними витратами.

На сьогодні такі будівлі потребують реконструкції, зокрема підвищення термічного опору зовнішніх огорожувальних конструкцій.

Станом на 2020 рік статистичні дані показують, що капітальний ремонт не проводився у 41,9% домогосподарств, що призвело до того, що значна частка будівель не відповідає мінімальним вимогам до енергоспоживання. Наведені дані свідчать про те що майже половина будівель характеризуються низькими теплотехнічними характеристиками огорожувальних конструкцій та зношеністю інженерних систем.

Незважаючи на те, що закон про комплексну реконструкцію житлового фонду шляхом реалізації програм, які затверджуються органами місцевого самоврядування, був прийнятий ще у 2006 році, масштабних прикладів проведення капітальних ремонтів досі недостатньо (рис. 1.3) [7].

Нормативні акти, що діють у багатьох західноєвропейських країнах, дотримуються двох стратегій: підвищення теплоізоляційної здатності огорожувальних конструкцій та зменшення тривалості роботи опалювальних приладів протягом доби [8]. Для досягнення найбільшого впливу впровадження енергоефективних заходів важливо враховувати взаємодію між структурними елементами будівлі та її інженерними системами при врахуванні динамічних умов всередині та ззовні.



Рис. 1.3 Інформація, де ніколи не було проведено капітального ремонту будівель в житловому фонді України

Енергоефективність в житлово-комунальному господарстві є ключовим аспектом для сталого розвитку суспільства та охоплює комплекс заходів, спрямованих на зниження витрат енергоресурсів при забезпеченні належного рівня життя та комфорту населення. Роль енергоефективності в житлово-комунальному господарстві полягає в декількох аспектах: а) зниження споживання енергоресурсів (електроенергія, природний газ, паливо); б) зменшення викидів парникових газів та інших забруднюючих речовин в атмосферу, що дозволяє знизити негативний вплив на навколишнє середовище та зберегти природні ресурси; в) забезпечення стабільної та комфортної температури в приміщеннях, підтримання якості повітря; г) впровадження енергоефективних технологій та заходів сприяє створенню нових робочих місць, стимулює інновації та розвиток виробництва екологічно чистих матеріалів та технологій, що в подальшому приводить до підвищення

конкурентоспроможності країни та стимулює економічний розвиток; д) забезпечення доступності комунальних послуг для всіх верств населення.

Для досягнення успіху в напрямку енергоефективності житлово-комунального господарства необхідна співпраця державних органів, бізнесу, наукових інститутів та громадських організацій. Разом вони можуть розробити та впровадити комплексні заходи з енергозбереження та сталого розвитку, які сприятимуть покращенню якості життя населення та збереженню природних ресурсів для майбутніх поколінь.

Як приклад, в країнах ЄС, для підвищення енергоефективності будівельних фондів постійно підвищуються вимоги до об'ємів кінцевого енергоспоживання. З 2019 року заборонено будівництво житлових будинків, споживання яких становить понад 60 кВт·год/м² для подібних до України кліматичних умов, а з 2020 року в Європі почався масовий перехід на будівництво будівель з «нульовим» рівнем енергоспоживання.

1.3. Аналіз будівельних норм і стандартів щодо теплового захисту

Дослідження теплового режиму будівель, показали, що фактичний тепловий захист зовнішніх огорожень на 15-20% нижче нормативного. Причинами є неврахований фактор неоднорідності конструкцій у діючих методиках теплотехнічних розрахунків, низька якість будівництва та невідповідна експлуатація будинків. Це приводить до неврахованих втрат тепла, незадовільному мікроклімату та зниженню довговічності будинків, тому будівельними нормами і правилами передбачене підвищення рівня теплового захисту огорожуючих конструкцій.

Впровадження у законодавчу базу вимог енергоефективності виступає важливим інструментом зниження енергетичної залежності держави. Сучасний напрям розвитку України потребує гармонізації чинної законодавчої та нормативної бази з європейськими стандартами й розроблення нових норм у сфері енергоефективності будівельного фонду, зокрема щодо якості мікроклімату в приміщеннях.

Системний комплекс нормативних документів встановлює обов'язкові вимоги з енергетичної безпеки, нормування фізичних показників, що характеризують виконання цих вимог, правила оцінювання показників енергоефективності на стадії проєктування будівельних об'єктів, експериментального їх виготовлення та використання, при введенні будівель в експлуатацію та в процесі їх експлуатації, методи випробувань і критерії оцінки відповідності будівельних виробів та об'єктів за показниками енергетичної ефективності.

На початку 2000-х років відбулось завершення процесу ратифікації Кіотського протоколу та зростання усвідомлення проблеми енергоефективності в Україні. В цей період було прийнято ряд нормативних актів, спрямованих на регулювання енергоефективності будівель, зокрема, затверджено «Положення про енергетичний аудит будівель».

У квітні 2007 року був введений ДБН В.2.6-31:2006 «Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель». Це була основа нормативного комплексу, яка вміщувала в собі встановлені правила та вимоги до проєктування теплоізоляції; вимоги до питомих тепловитрат будинку в цілому; поняття енергоефективності будівель та їх класифікація за показником енергоефективності; принципи нормування показників теплоізоляції огорожувальних конструкцій; удосконалену структуру необхідних теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій; методу, за якою можна візуально оцінити вологісний стан конструкції та ін. [3].

У 2008 р. було затверджено ДБН В.1.2-11-2008 «Основні вимоги до будівель і споруд. Економія енергії», які встановлюють основні положення основної вимоги до виробів, будівель і споруд, щодо забезпечення економії енергії та теплової ізоляції будівель [15].

У 2009 році було прийнято «Закон України про енергозбереження», який став основоположним для нормативної бази у сфері енергоефективності будівель. Закон передбачав встановлення обов'язкових вимог щодо енергоефективності будівель, а також створення системи сертифікації будівель з урахуванням енергоефективності [16].

У листопаді 2011 р. набрав чинності ДСТУ-Н Б В.1-27:2010 «Будівельна кліматологія» [11], який надав можливість під час проектування використовувати сучасні кліматичні показники, що не змінювалися з 1982 р. У цьому стандарті приділено значну увагу сонячній і тепловій радіації, а також затверджено нове архітектурно-будівельне кліматичне районування України, яке відображає зміни клімату, що відбулися за останні 30 років. На основі цього районування наразі розробляються типологічні вимоги до всіх типів будівель, які враховують вимоги енергозбереження та енергоефективності.

У липні 2013 р. введено в дію Зміну № 1 до ДБН В.2.6-31:2006 [3], яка посилила вимоги до теплоізоляційної оболонки та інтегральних характеристик енергоефективності будівель. Унаслідок цього середнє значення опору – теплопередачі для стін в Україні зросло приблизно на 15 %, для перекриттів і дахів – на 25%, а для вікон – на 30%. Серед ключових нововведень – оновлене температурне зонування території України, що уніфікувало вимоги до теплоізоляції огорожувальних конструкцій, та встановлення нормативних максимальних теплових витрат E_{max} , які визначаються призначенням будівлі, її поверховістю та температурною зоною експлуатації.

З травня 2017 р. почала діяти нова редакція норм з теплової ізоляції будівель – ДБН В.2.6-31:2016 [3]. Цей документ – імплементація Директиви Європарламенту і Ради ЄС 2010/31/ЄС «Про енергетичну ефективність будівель» і застосування єдиних з країнами ЄС стандартів для розрахунків показників енергоефективності.

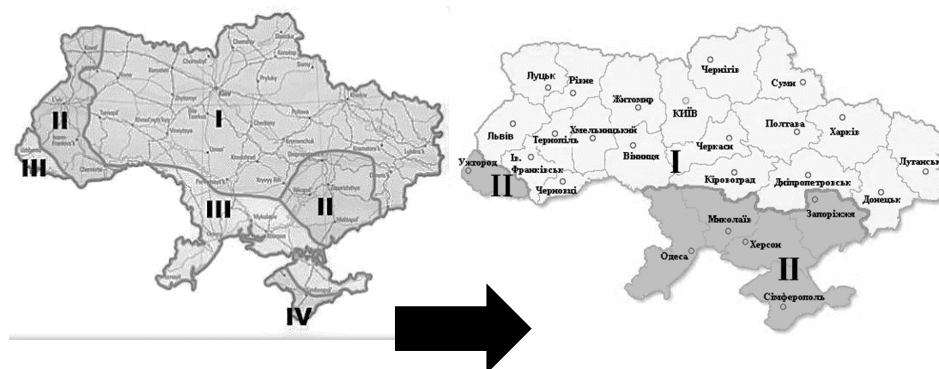


Рис. 1.4 Температурні зони території України

В новій редакції ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель» нормативний опір теплопередачі зовнішніх стін житлових будівель для I кліматичної зони складає $4 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ (збільшення на 20%), а для світлопрозорих огорожувальних конструкцій $0,9 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ (збільшення на 20%) [4].

В таблиці 1.1 наведена динаміка зміни нормативних опорів теплопередачі ОК житлових та громадських будівель.

Таблиця 1.1. Динаміка зміни показників нормативних опорів теплопередачі огорожувальної конструкції житлових та громадських будівель

Вид огорожувальної конструкції	Нормативний опір теплопередачі $R_q \text{ min}$, $\text{м}^2 \text{ К/Вт}$							
	1981	1993	2006 I зона	2013 I зона	2017		2022	
					I зона	II зона	I зона	II зона
Зовнішні стіни	0,95	2,2	2,8	3,3	3,3	2,8	4,0	3,5
Світлопрозорі огорожувальні конструкції	0,48	0,53	0,6	0,75	0,75	0,6	0,90	0,70

Наразі Україна динамічно прямує до європейських стандартів теплової ізоляції, що відображається у послідовному зростанні значень нормативних опорів теплопередачі для огорожувальних конструкцій (рис. 1.5).

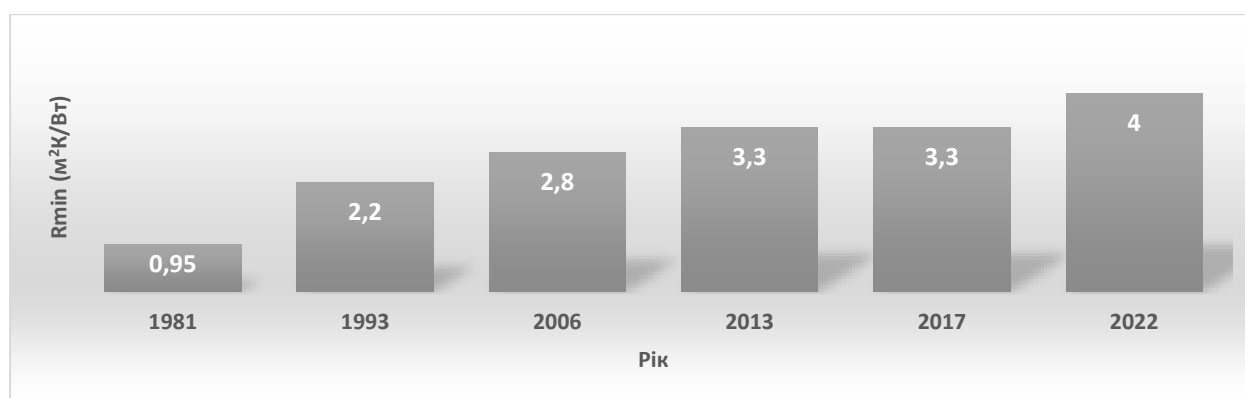


Рис. 1.5 Динаміка розвитку коефіцієнту нормативного термічного опору R_n , зовнішніх стін на території України

ДБН В.2.6-31 встановлює обов'язкові вимоги до показника енергоефективності будівель – питомого енергоспоживання, нормативні

теплоізоляційні характеристики елементів будівель є похідними. При реконструкції, капітальному ремонті будівель в цілому або їх відокремлених частин мінімальною вимогою є виконання умови:

$$E_{P_{us}} \leq 1,2 \times E_{P_p} \quad (1.1)$$

Граничне значення питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні житлових та громадських будівель E_{P_p} наведено в таблиці 1 ДБН В.2.6-31 [4].

При визначенні тепловтрат будівлі важливо правильно визначити коефіцієнти теплопередачі огорожувальних конструкцій. Критерієм для оцінки теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій будівель є «приведений опір теплопередачі», який складається з термічного опору конструкції та опору тепловіддачі внутрішньої і зовнішньої поверхонь. Тобто, за показником $R_{опр}$ можна вирахувати скільки тепла втрачає огорожувальна конструкція. ДБН В.2.6-31:2006 «Теплова ізоляція будівель» [4] регламентує нормативні мінімально допустимі значення опору теплопередачі R_{qmin} зовнішніх огорожувальних конструкцій житлових та громадських будинків. Для визначення необхідної товщини шару теплоізоляції необхідно виконати відповідний теплотехнічний розрахунок. Зазвичай, зовнішні стіни з фасадною теплоізоляцією є термічно неоднорідними конструкціями і для коректного визначення приведенного опору теплопередачі всієї непрозорої огорожувальної конструкції або її частини необхідно враховувати вплив різноманітних теплопровідних включень та інших конструктивних елементів, що обумовлюють термічну неоднорідність.

У період 2017–2020 років було прийнято серію нормативних актів, що сприяли підвищенню енергоефективності будівель, а також розроблено технічні регламенти, норми та правила, які встановлюють вимоги до енергоефективності будівельних конструкцій, систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. Наразі триває подальший розвиток нормативної бази у сфері енергоефективності будівель, зокрема розроблення нових технічних регламентів і стандартів, що враховують сучасні технології та передові підходи до енергоефективного будівництва.

Незважаючи на складні умови, пов'язані з військовими діями на території України, у сфері нормативного забезпечення енергозбереження спостерігається суттєвий прогрес. Зокрема, в останні роки здійснено значний крок у розробленні, актуалізації та гармонізації ДБН і стандартів, що регламентують вимоги до енергоефективності будівель і теплового захисту огорожувальних конструкцій. Оновлення нормативної бази відбувається з урахуванням положень європейського законодавства, зокрема директив Європейського Союзу у сфері енергоефективності будівель, що свідчить про поступову інтеграцію України до європейського нормативного простору. Це створює передумови для підвищення якості проектування, термомодернізації будівель та ефективного впровадження енергоощадних технологій.

Основні нормативні документи включають:

ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель» – встановлює вимоги до термічного опору стін.

ДСТУ Б В.2.6-189:2013 «Енергоефективність будівель» – визначає методи розрахунку теплових втрат [12].

EN 12831 «Energy performance of buildings» – європейський стандарт, що встановлює правила визначення енергетичних характеристик будівель [13].

ISO 6946 «Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance» – міжнародний стандарт щодо оцінки термічного опору будівельних конструкцій.

Дотримання цих норм забезпечує зниження енергоспоживання та відповідність сучасним вимогам до енергоефективності.

1.4. Вплив факторів зовнішнього середовища на теплопередачу

Сучасна будівля – це складний комплекс різних інженерних систем, конструкцій і матеріалів. Крім вимоги безпечної експлуатації, будівлі повинні також відповідати вимогам, які пов'язані з раціональним використанням енергії та тепловим комфортом. Саме через зовнішні ОК будівлі здійснюється вплив погодно-кліматичного чинника на мікроклімат всередині приміщення (рис. 1.6), а

врахування зовнішніх кліматичних умов при вивченні теплових режимів будівель є одним з важливих завдань при складанні теплового балансу будівлі [3].

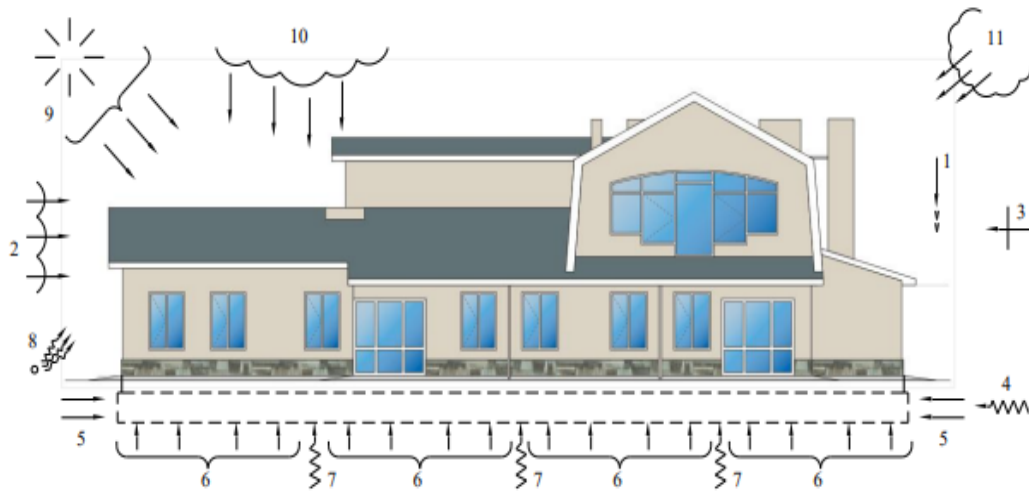


Рис. 1.6 Види впливу на тепловий та повітряний режими:

1 – постійні та тимчасові вертикальні силові дії; 2 – вітер; 3 – сейсмічна силова дія; 4- вібрації; 5 – боковий тиск ґрунту; 6 – тиск ґрунту; 7 – ґрунтова волога; 8 – шум; 9 – сонячна радіація; 10 – атмосферні опади; 11 – стан атмосфери (змінна температура, вологість)

Завдання забезпечення теплового режиму будівлі – організація взаємозв'язаних теплових потоків в архітектурно-конструктивній системі з різними складовими елементами та інженерним обладнанням (рис. 1.7). Процеси, що впливають на створення теплового режиму приміщень, необхідно розглядати в нерозривному взаємозв'язку, оскільки їх взаємний вплив являється суттєвим.



Рис. 1.7 Схема взаємодії основних підсистем будівлі

Тепломасообмін між зовнішнім і внутрішнім повітрям у будівлі відбувається двома шляхами: природним (пасивний обмін) та штучним (обмін за допомогою технічних засобів і технологій). Під впливом різниці температур між зовнішнім і внутрішнім повітрям, швидкості вітру та інсоляції приміщення втрачає або отримує теплоту через зовнішні огорожувальні конструкції залежно від пори року.

У разі природного обміну повітря надходить у приміщення та видаляється з нього через нещільності, спеціальні отвори в огорожувальних конструкціях або каналами систем природної вентиляції. Оскільки повітрообмін у будівлі значною мірою залежить від теплового режиму, інфільтрація холодного зовнішнього повітря всередину приміщення призводить до додаткових витрат енергії на його нагрівання. Таким чином, втрати теплоти внаслідок інфільтрації холодного повітря становлять значну частку загальних тепловтрат [8].

Також необхідно враховувати кількість зовнішнього повітря, що інфільтрується всередину приміщень. При температурі нижчої від нуля градусів, і різниці тисків, яка спричинена сильним вітром, втрати тепла відбуваються як шляхом теплопровідності стінових конструкцій, так і шляхом холодної інфільтрації холодного повітря через нещільності огороження.

Штучний теплообмін необхідно впроваджувати, коли природні методи не дають необхідних результатів енергозбереження для підтримки комфортної внутрішньої температури в будівлі, а показники нормативних параметрів кратності повітрообміну і швидкості руху повітря в залежності від призначення приміщення повинні орієнтуватися на уникнення однорідності температури і застою повітря. На сучасному рівні технологій підтримання комфортних мікрокліматичних умов усередині приміщень будівель здійснюється за допомогою систем забезпечення мікроклімату, такі як системи кондиціонування, системи опалення та системи вентиляції.

Для проведення оцінки мікроклімату у приміщенні використовують шість основних умов теплового комфорту: температура повітря, відносна вологість повітря; швидкість потоку повітря; середня радіаційна температура всіх поверхонь

в межах приміщення; рівень фізичної активності людей, що знаходяться всередині приміщення та термічний опір одягу. Всі вище перераховані умови слід розглядати не як окремо взяті, а як цілісну систему, за допомогою якої можна отримати усереднену оцінку комфорту. Значення параметрів мікроклімату слід приймати в залежності від періоду календарного року, призначення приміщення і вимог комфортного перебування людини в ньому в будь-який час, а також регламентованого технологічного процесу, що відбувається. Підтримання параметрів мікроклімату в холодний період року забезпечується системою опалення, а в теплий період року системою кондиціонування [9].

При впровадженні технологій для створення комфортних умов проживання в будівлях вкрай важливо дотримуватися норм енергозбереження. Будь-які заходи мають не лише зменшувати потребу в енергії, а й мінімізувати шкоду, завдану довкіллю, та продовжувати термін використання відновлюваних ресурсів, таких як сонячна енергія, геотермальне тепло й природна вентиляція. Крім того, використання високопотенційної енергії повинні бути зведені до мінімуму [8].

На огорожувальні конструкції будівлі, технічний стан їхніх матеріалів та ефективність забезпечення комфортних умов впливає рівень вологості. Основними шляхами надходження вологи в конструктивні елементи будівлі є: будівельні й ремонтні роботи, ґрунт, метеорологічні явища, сорбційні властивості будівельних матеріалів, а також волога, пов'язана з тепловим режимом самих огорожувальних конструкцій, що виникає, коли їх температура дорівнює або є нижчою за температуру точки роси.

Крім загального повітрообміну, значний вплив на вологість повітря в приміщенні мають розміщення джерел вологовиділення, а також особливості поширення вологи в межах будівлі або комплексу суміжних неізольованих приміщень. Перенесення вологи зумовлене нерівномірним розподілом тиску в окремих зонах приміщення та природними повітряними потоками, спрямованими в бік нижчого тиску.

У перші роки експлуатації нових будівель спостерігається підвищений вологовміст більшості огорожувальних конструкцій, особливо тих, що виконані з

бетону, цегляної кладки та деревини. У зв'язку з цим у більшості зведених будинків значна частина огорожувальних конструкцій містить надлишок хімічно незв'язаної вологи і в початковий період експлуатації віддає її повітряному середовищу приміщень. Це, в свою чергу, призводить до значних тепловтрат через холодні огорожувальні конструкції, що прямо впливає на рівень енерговитрат для забезпечення рівня комфорту в приміщеннях, а саме їх збільшення порівняно з нормативними вимогами.

Значні коливання температури повітря в зимовий період та робота опалювальних приладів можуть спричиняти різкі перепади температури в приміщенні. Для забезпечення комфортного мікроклімату в цей період необхідно визначати теплостійкість приміщення. Метою такого розрахунку є забезпечення огорожувальних конструкцій необхідними теплозахисними властивостями, що гарантують підтримання в приміщенні практично сталої комфортної температури повітря за періодичних змін параметрів зовнішнього та внутрішнього середовища.

Згідно ДСТУ-Н Б В.2.6-190:2013 [10] теплостійкість приміщення визначають такі показники: амплітуда коливань температури приміщення $A_{тв}$, °С, коефіцієнт теплопоглинання B_j , Вт/(м²К) та коефіцієнт теплосвоєння матеріалу окремих шарів s , Вт/(м²К).

Відповідно до ДБН В.2.6-31 для житлових та громадських будинків обов'язкове виконання умов теплостійкості приміщення в зимовий період року [3]:

$$A_{тв} \leq 1,5 \quad (1.2)$$

де: $A_{тв}$ – амплітуда коливань температури внутрішнього повітря (°С) та розраховується за формулою:

$$A_{тв} = \frac{0,7q_{пр}m}{\sum_{j=1}^k B_j F_j} \quad (1.3)$$

де: $q_{пр}$ – тепловтрати приміщення, Вт;

m – коефіцієнт нерівномірності тепловіддачі системи опалення, приймається згідно з таблицею 1.1 [3];

F_j – площа внутрішньої поверхні j -ї зовнішньої огорожувальної конструкції, м²;

k – кількість зовнішніх огорожувальних конструкцій у приміщенні;

B_j – коефіцієнт теплопоглинання, Вт/(м²·К), внутрішньою поверхнею j -ї зовнішньої огорожувальної конструкції приміщення, що визначається за формулою:

$$B_j = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \frac{1}{Y_B}} \quad (1.4)$$

де: Y_B – показник теплосасвоєння поверхнею непрозорої огорожувальної конструкції, Вт/(м²·К), розраховується за формулами, згідно ДБН В.2.6-31:2006;

$\alpha_{\text{вн}}$ – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкцій, Вт/(м²·К).

Тепловтрати приміщення розраховуються за формулою:

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{теп}} + Q_{\text{інф}} \quad (1.5)$$

де $Q_{\text{теп}}$ – тепловтрати приміщення через теплоізоляційну оболонку, Вт; $Q_{\text{інф}}$ – тепловтрати приміщення за рахунок вентиляції та інфільтрації, Вт.

Тепловтрати приміщення через теплоізоляційну оболонку $Q_{\text{теп}}$ визначаються за формулою:

$$Q_{\text{теп}} = (t_{\text{вн}} - t_{\text{зов}}) \left[\sum_{j=1}^n \frac{F_j}{R_{\Sigma j_{\text{нп}}} \cdot k} + \frac{F_{\text{сп}}}{R_{\Sigma \text{сп}}} \right] \quad (1.6)$$

де $t_{\text{вн}}$ – температура повітря в приміщенні, °С, що приймається згідно з додатком Г ДБН В.2.6-31; $t_{\text{зов}}$ – температура повітря найхолоднішої п'ятиденки, що приймається згідно з таблицею 2 ДСТУ-Н Б В.1.1-27 [11]; F_j – площа j -го непрозорого елемента огорожувальної конструкції, м²; $R_{\Sigma j_{\text{нп}}}$ – опір теплопередачі j -го непрозорого елемента огорожувальної конструкції, (м²·К)/Вт, визначається згідно з ДСТУ Б В.2.6-189; k – безрозмірний коефіцієнт, що враховує неоднорідність огорожувальної конструкції; $F_{\text{сп}}$ – площа світлопрозорої частини огорожувальної конструкції, м²; $R_{\Sigma \text{сп}}$ – приведений опір теплопередачі світлопрозорої конструкції, (м²·К)/Вт; n – кількість непрозорих елементів огорожувальної конструкції.

Тепловтрати приміщення за рахунок інфільтрації та вентиляції $Q_{\text{інф}}$ визначаються за формулою:

$$Q_{\text{інф}} = 0,27(t_{\text{вн}} - t_{\text{зов}})V \quad (1.7)$$

де V – об'єм приміщення, м^3 .

Нормування теплостійкості приміщень у зимовий період практично не зазнало змін із середини минулого століття і не відповідає сучасним вимогам комфорту. Існуюча методика дає змогу враховувати лише трансмісійні тепловтрати та тепловтрати на вентиляцію під час оцінювання теплостійкості, не беручи до уваги теплонадходження від сонячної радіації та внутрішніх джерел.

Для холодного періоду року визначальними параметрами є температура зовнішнього повітря та швидкість вітру. Характерною особливістю теплопередачі в теплий період є добова періодичність зовнішніх теплових впливів, у зв'язку з чим виникає задача розповсюдження температурного поля через багат шарову конструкцію. Теплотехнічну ефективність огорожувальної конструкції можна оцінити за максимальною температурою внутрішньої поверхні, середньодобовою температурою внутрішньої поверхні та амплітудою її коливань.

Оптимізація теплового режиму будівлі, не обладнаної системами кондиціонування повітря, у літній період полягає у визначенні такого співвідношення між показниками тепло- та сонцезахисту огорожувальних конструкцій, зокрема кратністю та режимом повітрообміну, за якого забезпечується максимальний захист від сонячної радіації.

З введенням в дію ДСТУ Б EN 15251:2011, оцінку теплового комфорту, на практиці, здійснюють за допомогою використання двох статистичних індексів: очікувана середня оцінка мікроклімату – PMV (Predicted Mean Vote) та очікуваний відсоток невдоволених мікрокліматом – PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту за допомогою розрахунків PMV, PPD та критеріїв місцевого теплового комфорту допомагає оцінити прийнятність умов навколишнього середовища для забезпечення теплового комфорту людини. Детальний розрахунок цих показників наведено у ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 [10, 11].

Через індивідуальні відмінності неможливо визначити такий тепловий стан навколишнього середовища, який задовольняв би всіх навіть за оптимальних умов

у приміщенні, однак можна встановити параметри середовища, прийнятні для певного відсотка людей.

Перелічені показники дають змогу оцінити комфортність існуючого внутрішнього середовища, проте не використовуються як розрахункові параметри під час проектування будівель. Оскільки навантаження на будівлю змінюється в просторі та часі, спроектовані системи не завжди відповідають проєктним рішенням протягом усього періоду експлуатації. Тому необхідно оцінювати довгострокові характеристики будівлі щодо її внутрішнього середовища.

Оцінювання та визначення методів досягнення теплового комфорту можливі лише за умови комплексного аналізу застосованих будівельних технологій, параметрів і методів теплової модернізації, а також установлених вимірювальних систем і регулювальних приладів.

Важливим завданням організації енергозберігаючих режимів експлуатації будівель є виявлення ділянок з найбільшими тепловими втратами на поверхні огорожувальних конструкцій, а також пошук та впровадження інноваційних рішень щодо зниження тепловтрат та приведення їх у відповідність до чинних норм. Також при реконструкції будівель варто в першу чергу враховувати майбутню ефективність даних рішень, оскільки практика показує, що теплова реконструкція будівель не є дешевим процесом, але може дозволити заощадити значні експлуатаційні витрати, такі як термостабілізація, підтримання оптимальної температури та вологості.

Найбільшу увагу у вирішенні цієї проблеми приділяють не лише новому будівництву, а й існуючому фонду житлових і громадських будинків, що експлуатуються, теплотехнічні характеристики яких не задовольняють сучасні вимоги з енергозбереження. Зниження величин в енергоспоживанні будинків, що експлуатуються, може бути досягнуте підвищенням вимог щодо теплотехнічних характеристик матеріалів огорожувальних конструкцій, а також улаштуванням опалювальних систем із керованими тепловими режимами.

Ефективний захист від зовнішніх впливів забезпечується правильним вибором матеріалів і технологій утеплення, включаючи використання парозахисних та гідроізоляційних шарів.

1.5. Сучасні тенденції та напрями досліджень

Ефективне використання енергії полягає в зменшенні кількості оплачуваної енергії без зниження комфорту. Вкрай важливими є питання взаємодії сучасної теплової ізоляції з навколишнім середовищем та пошук матеріалів, які будуть відповідати екологічним вимогам і вимогам соціального комфорту.

Науковці та дослідники активно займаються вивченням теплопередачі через огорожувальні конструкції, розробкою нових теплоізоляційних матеріалів та технологій, а також вдосконаленням методів оцінки енергоефективності будівель. Це дозволяє постійно покращувати якість та ефективність будівельних матеріалів та систем для забезпечення теплового комфорту та зниження енерговитрат.

Огляд літератури [22-25, 34, 35, 40, 41] показує, що теплопередача через огорожувальні конструкції є актуальною темою в будівельній галузі, і дослідження в цьому напрямку продовжуються для забезпечення сталого та ефективного функціонування будівельного сектору. Застосування сучасних технологій та інноваційних матеріалів дозволяє підвищити енергоефективність будівель та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, а забезпечення енергоефективності в житлово-комунальному господарстві є важливим кроком у збереженні енергоресурсів та створенні сталої та екологічно чистої житлової інфраструктури.

В роботі [26] автори експериментально розглянули вплив утеплення огорожувальних конструкцій на потік тепла, що проходить крізь них та на температуру повітря в приміщенні. У розглянутій моделі зроблено акцент на необхідності врахування впливу зміни насиченості теплового потоку на поверхні огорожувальних конструкцій, що утепляються та на середньозважене, усереднене значення насиченості теплового потоку приміщення в цілому.

У статті [27] показано застосування варіаційних методів щодо розрахунку переносу тепла в багатошарових конструкціях. Одним із наближених розв'язків є заміна одношарової конструкції на багатошарову. При цьому особливу роль відіграє правильний вибір еквівалентних теплофізичних параметрів. В.А. Пашинський та О.А. Плотніков у статті [43] розглянули методику експериментального дослідження температурного режиму огорожувальних конструкцій, які забезпечують отримання статичних характеристик випадкових процесів змін температури в конструкціях в режимі нормальної експлуатації будівель. У [35] автором розроблено теплофізичну модель розрахунку нестационарних температурних полів в багатошарових конструкціях будівель з врахуванням тепломасопереносу. Отримано і узагальнено експериментальну інформацію про зміну в часі температури і теплових потоків.

Підвищення опору теплопередачі огорожувальної конструкції - один з основних способів підвищення енергоефективності будівель. Для визначення параметрів теплозахисту ОК використовують два підходи – поелементний та експлуатаційний [36-38].

При виконанні теплотехнічних розрахунків, а саме визначення термічного опору огорожувальних конструкцій, проводиться розрахунок товщини ізоляційного шару з врахуванням товщини інших складових конструкції. В чинних нормативних документах наведені розрахункові залежності, які отримані для стаціонарного режиму роботи огорожувальних багатошарових конструкцій, але вони не можуть враховувати змінну температуру навколишнього повітря при аналізі тепловіддачі складових стін у будь-який момент часу [34].

Як показує дослідження, на даний час питання теплоізоляції розглядалося багатьма українськими і закордонними вченими [39, 42-46]. Однак, не до кінця висвітлено питання теплоізоляції саме житлових будинків та будівель громадського призначення, а інформація про сучасні методи утеплення будівель потребує систематизації. На енергоефективність будівлі впливають енергоефективні конструктивні рішення огорожувальних конструкцій. Експериментальні та чисельні їх дослідження висвітлені в роботах [49-54]. При

цьому, встановлено, що найбільш досконалим щодо енергоефективності, екологічності і довговічності є вентиляований фасад.

В працях [54-60] розглянуто конструктивні заходи з підвищення енергоефективності та їх оптимізація. Дослідження залежності енергоефективності будівель від їх архітектурно-конструктивних систем та методи аналізу наведено у статтях [61-63]. Одним із способів розв'язання проблеми оптимізації споживання енергетичних ресурсів, які зазначені в рамках чинних та запланованих державних програмах з підвищення енергоефективності, є проектування пасивних будинків з використанням енергії сонячної радіації. Проектування пасивних будівель може значно зменшити експлуатаційні витрати, які йдуть на створення необхідних умов мікроклімату. Саме тому актуальними є дослідження сучасних напрямків та методів енергозбереження в будівлях, основна мета яких полягає у розробці наукових та прикладних задач підвищення енергоефективності будинків шляхом їх реконструкції або проектуванні, зниження втрат тепла та мінімізації витрат на обігрів приміщень в будівлях з нульовим рівнем шкідливих викидів, нульовим споживанням енергії та енергоактивних будівель [64].

Проведений літературний огляд підтверджує необхідність подальшого дослідження питань щодо комплексної термомодернізації огорожувальних конструкцій та впливу кожного окремого заходу на теплофізичні та енергетичні показники будівель, що в подальшому дозволить обґрунтовувати оптимальний перелік впроваджуваних заходів для забезпечення необхідних умов мікроклімату норм. Тому, суттєве підвищення енергоефективності будинків і споруд є одним із першочергових завдань для науковців.

Сучасні дослідження зосереджені на розробці матеріалів з підвищеними теплоізоляційними властивостями: аерогелеві утеплювачі, вакуумні ізоляційні панелі, пінополіуретанові та полімерні утеплювачі, екоутеплювачі (льон, конопля, целюлоза).

Важливим напрямом досліджень є також впровадження комбінованих систем утеплення, які поєднують різні матеріали та технології для досягнення оптимальних показників теплозахисту.

Підвищення енергоефективності будівель є одним із ключових завдань сучасного будівництва, що визначає розвиток нових теплоізоляційних матеріалів і технологій. Сучасні дослідження у сфері теплоізоляції спрямовані на підвищення ефективності, екологічності та адаптивності утеплювальних матеріалів. Впровадження цих рішень допоможе знизити споживання енергії та покращити комфорт у будівлях майбутнього.

Висновки до розділу

1. Енергозбереження в будівництві та забезпечення температурного комфорту в приміщеннях потребують комплексного підходу, що передбачає поєднання сучасних технологій, ефективних матеріалів і раціональних інженерних рішень, а також врахування поведінкових аспектів споживання енергії користувачами будівель.
2. Аналіз сучасного стану досліджень у галузі теплоперенесення через огорожувальні конструкції показав, що значна частка тепловтрат припадає на стінові конструкції, що обґрунтовує необхідність підвищення їх теплозахисних характеристик.
3. Встановлено, що кількість комплексних досліджень теплопередачі через стінові огорожувальні конструкції в реальних умовах експлуатації є обмеженою. Найбільш достовірні результати забезпечуються за умови поєднання експериментальних і розрахункових методів із урахуванням реальних кліматичних факторів.
4. Аналіз нормативної бази України та міжнародних стандартів засвідчив тенденцію до посилення вимог щодо теплозахисних характеристик огорожувальних конструкцій і енергоефективності будівель.
5. Показано, що теплотехнічні характеристики стінових конструкцій суттєво залежать від зовнішніх кліматичних факторів, зокрема температури повітря, швидкості вітру, інсоляції та вологості.
6. Поєднання експериментальних і теоретичних досліджень дозволяє отримати комплексну оцінку теплових властивостей огорожувальних конструкцій і є

основою для розроблення ефективних рішень у сфері теплоізоляції та термомодернізації будівель.

7. Сучасні наукові дослідження спрямовані на створення інноваційних теплоізоляційних матеріалів із підвищеними теплотехнічними характеристиками та довговічністю.
8. Отримані результати формують наукову основу для подальших досліджень і розроблення практичних рекомендацій щодо підвищення енергоефективності теплоізольованих стінових конструкцій.

РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ТЕПЛОІЗОЛЬОВАНИХ СТІНОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

2.1. Загальні принципи теплозахисту будівель

В попередньому розділі, розглядаючи загальний енергетичний баланс будівель, було визначено, що близько 80% теплової енергії витрачається через огорожувальні конструкції. Очевидно, що при такому розподілі тепловтрат, основним засобом запобігання або їх усунення є заходи, спрямовані на підвищення ефективності теплоізоляції оболонки огорожувальних конструкцій будівель та споруд. Тому, зараз активно розробляються та впроваджуються спеціальні загальнодержавні та місцеві програми для підтримки механізмів покращення енергетичних показників будівель, особливо у сфері утеплення стінових конструкцій, заміни покриття та вікон.

Адаптація до нових норм опору теплопередачі сприяє заміні звичайних одношарових стінових конструкцій на багатошарові. Ці конструкції вимагають не лише використання надійних несучих та ізоляційних компонентів, а й розуміння теплофізичних механізмів і застосування цих концепцій у процесі проектування. Впровадження цих технологій значною мірою сприяє безперебійній роботі та створенню задовільних умов життя для мешканців. Отже, пошуки оптимальних підходів до цієї проблеми тривають. Ефективні системи утеплення незамінні для модернізації будівель і споруд, які не відповідають нормам опору теплопередачі. Проте, попри нагальну потребу в додатковому утепленні захисних конструкцій, його розробка та реалізація залишається складною.

Основна мета ізоляції – підтримання постійної температури всередині приміщення, незважаючи на коливання температури зовнішнього повітря, шляхом запобігання надмірним втратам тепла через товщину стіни. Зменшити масу і товщину огорожувальних конструкцій можна шляхом ефективної теплоізоляції, що дозволяє збільшити допустимі розміри збірних елементів і зменшити витрати основних будівельних матеріалів. Тому, перед проведенням заходів з утеплення існуючих будівель, необхідно виконати чотири основні задачі (Рис. 2.1).

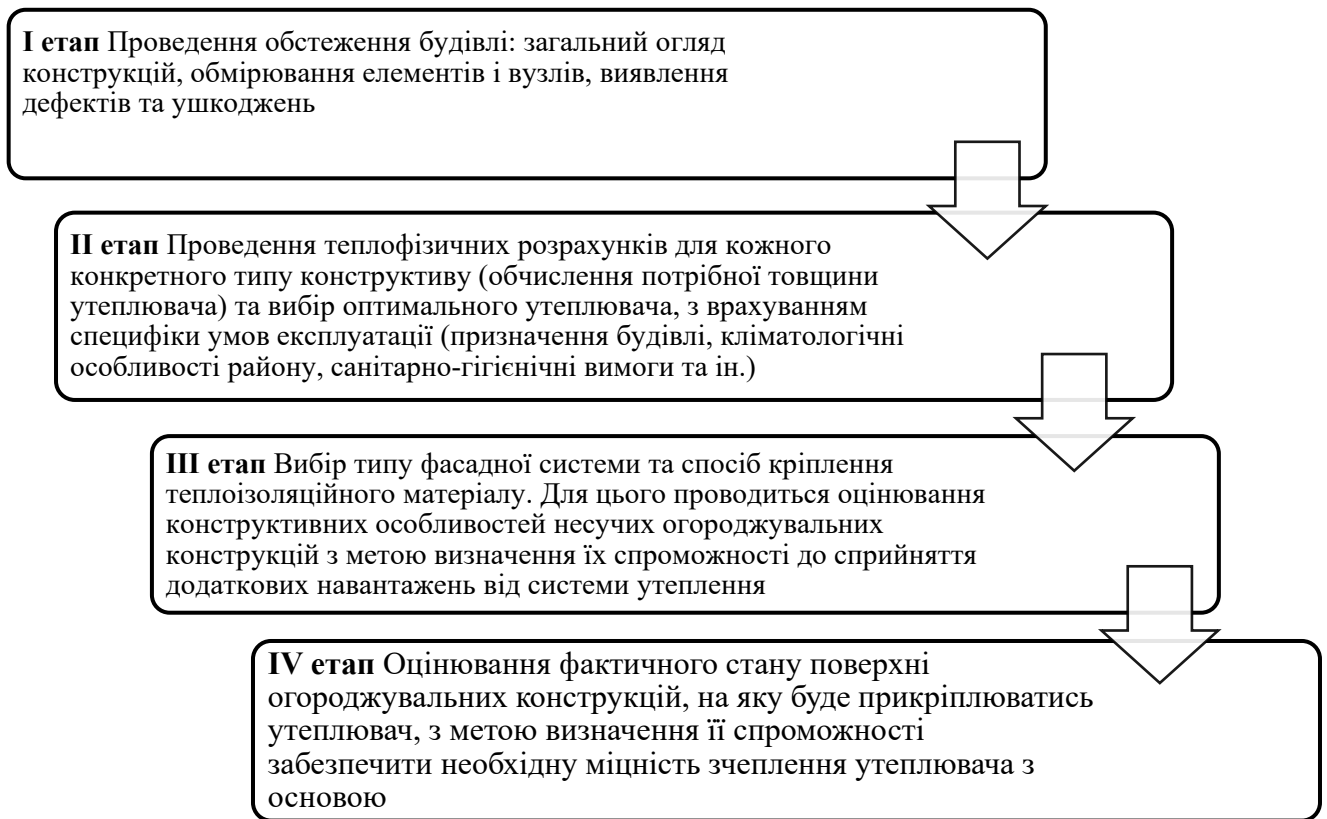


Рис. 2.1. Етапи вибору додаткового теплозахисту

Для проведення термомодернізації важливо всебічно оцінити варіанти технічних рішень перед прийняттям рішень. Це передбачає створення відповідного набору критеріїв для використання в якості основи для оцінювання ефективності систем ізоляції. Не менш важливим завданням є вибір типу фасадної системи та спосіб кріплення теплоізоляційного матеріалу.

Теплозахист будівельних конструкцій є ключовим фактором забезпечення енергоефективності та комфорту всередині приміщень. Основні принципи теплозахисту включають: мінімізацію тепловтрат через використання якісних теплоізоляційних матеріалів; запобігання утворенню містків холоду на стиках конструкцій, у вузлах примикання тощо; регулювання вологості всередині конструкцій шляхом застосування паро- та гідроізоляційних шарів; оптимізацію співвідношення товщини утеплювача та термічного опору конструкції; врахування кліматичних умов при виборі матеріалів і конструктивних рішень.

Ефективний теплозахист сприяє зниженню енергоспоживання на опалення та кондиціонування, а також підвищує довговічність будівельних конструкцій.

2.2. Класифікація теплоізованих стінових конструкцій за розташуванням теплоізоляційного шару

Сучасні огорожувальні стінові конструкції переважно багат шарові та складаються з теплоізоляційного шару, захисних міцних та щільних шарів. Існує три методи нанесення теплоізоляції – внутрішній, зовнішній та розподілений (комбінований). Варіант розташування теплозахисту обирається на основі аналізу всіх можливих способів її влаштування з урахуванням їхніх переваг і недоліків.

Внутрішня теплоізоляція передбачає нанесення теплоізоляційного матеріалу на внутрішню поверхню стіни (рис. 2.2).

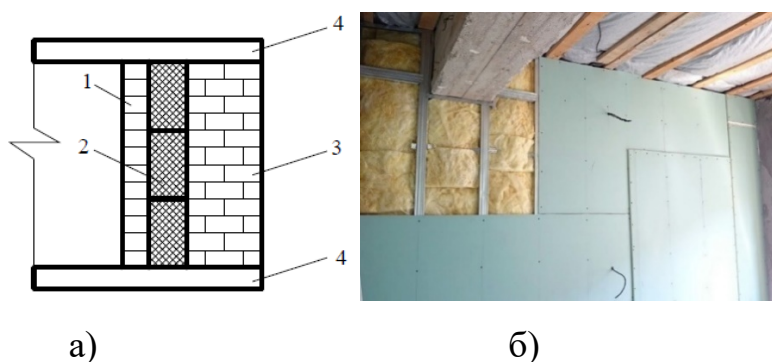


Рис. 2.2. Внутрішня ізоляція

- а) 1 – внутрішній оздоблюваний шар; 2 – теплоізоляційний шар; 3 – стіна; 4 – плити прикриття; б) приклад внутрішньої теплоізоляції пінопластом

При використанні даного способу необхідно врахувати, що температура поверхні стінки під шаром утеплювача при середній температурі зовнішнього повітря в найбільш холодний місяць не повинна бути нижча «точки роси» для водяної пари в повітрі приміщення та опір теплопередачі утеплюючого шару не повинен бути більше від загального опору теплопередачі існуючої стіни. Невиконання цієї умови приведе до зниження температури поверхні стіни під шаром утеплювача. При зниженні цієї температури нижче температури «точки роси» відбудеться конденсація водяної пари на поверхні стіни і намокання утеплювача, що істотно порушує температурно-вологісний режим конструкції стіни.

До переваг даного способу відноситься швидке нагрівання повітря в приміщенні, оскільки для досягнення комфортної температури у приміщенні

необхідно менше енергії та можливість провадження робіт по влаштуванню теплозахисту в будь-який період року незалежно від способу кріплення. При такому способі теплоізоляційний матеріал перебуває в сприятливих умовах та не потребує додаткового захисту. До недоліків відносять: зменшення площі приміщення за рахунок збільшення товщини стіни; необхідність захисту теплоізоляційного матеріалу та стіни від зволоження шляхом улаштування пароізоляційного шару перед теплоізоляційним матеріалом [65, 66].

Слід зазначити, що в більшості випадків влаштування додаткової теплоізоляції із внутрішньої сторони стіни здійснюється на стадії реконструкції з повною заміною санітарно-технічного обладнання та конструкцій підлоги.

Зовнішня теплоізоляція передбачає встановлення ізоляційного шару на зовнішній стіні будівлі (рис. 2.3). Головною вимогою розміщення теплозахисту додаткової теплоізоляції зовні є дотримання умови, що опір паропроникнення теплоізоляційного шару разом з шаром зовнішнього облицювання не повинен перевищувати опір паропроникнення стінки. Невиконання цієї вимоги може призвести до того, що частина водяної пари, яка йде з приміщення назовні, може залишитись в стінці на межі з утеплювачем. «Точка роси» зміщується в зовнішній теплоізоляційний шар, внутрішня частина стіни не зволожується, і не потребує додаткової пароізоляції.

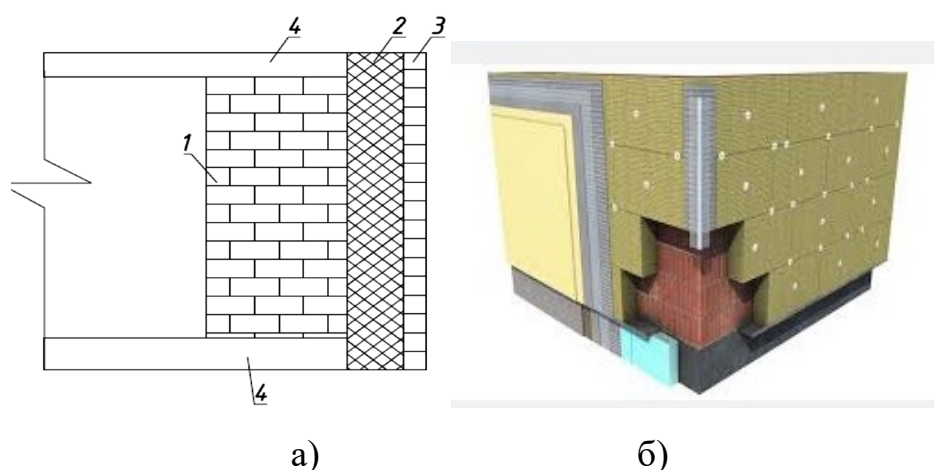


Рис. 2.3 Зовнішня ізоляція

- а) 1 – стіна; 2 – ізоляційний матеріал; 3 – зовнішня штукатурка; 4 – плити перекриття; б) приклад зовнішньої теплоізоляції мінеральною ватою

Перевагою зовнішньої теплоізоляції є збільшення теплоакумулювальної здатності стіни. У випадку відключення джерела тепlopостачання буде спрацьовувати ефект «голландської печі», тобто стіна буде охолоджуватись в рази повільніше.

Даний метод дає можливість покращити теплотехнічні характеристики оболонки будівлі, продовжити термін її експлуатації, запобігти механічним деформаціям зовнішніх стін шляхом малих коливань температур у конструктивному шарі, підвищити гідрофобні властивості стін, покращити зовнішній вигляд фасаду, знизити повітря і звукопроникність, забезпечити високий рівень енергозбереження і, як наслідок, знизити витрати на опалення будівлі. Варто звернути увагу, що при зовнішній теплоізоляції не утворюються термальні мости. Відповідно, це підвищує теплову інерцію огороження й сприяє поліпшенню її теплозахисних властивостей при нестационарній теплопередачі. Також знижується вплив температурних коливань зовнішнього повітря на внутрішній клімат приміщення.

На сьогодні улаштування теплозахисту із зовнішньої та внутрішньої сторони стіни одночасно (розподілена ізоляція) (рис. 2.4) застосовується в особливих випадках, коли неможливо забезпечити відповідний рівень теплозахисту методом нанесення теплоізоляції лише з одного боку стіни або для нових будівель.

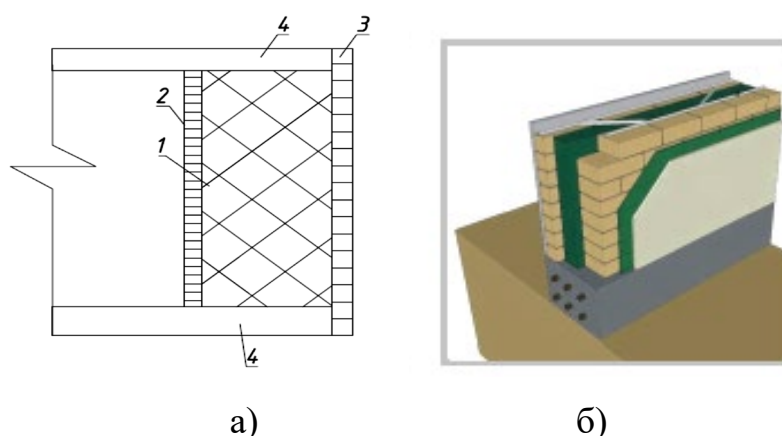


Рис. 2.4 Розподілена ізоляція

а) 1 – матеріал розподіленої ізоляції; 2 – штукатурка або гіпсова панель; 3 – зовнішня штукатурка; 4 – плити перекриття; б) приклад розподіленої ізоляції (пінопласт + подвійна стіна)

З точки зору ефективності утеплення найбільш поширений метод утеплення стін – зовнішній. Проведення термомодернізації елементів зовнішньої оболонки будівель під час капітального ремонту чи реконструкції, з метою приведення їх теплозахисту до нормативного рівня, вимагає зваженого підходу до вибору можливої системи додаткового утеплення. Для зменшення тепловтрат з ОК будівель в зовнішній повітряний простір застосовуються спеціальні теплоізоляційні конструкції, які розрізняються в залежності від матеріалу основного теплоізоляційного і покривного шарів, а також за їх побудовою та монтажем [67].

На рис. 2.5 представлені графіки розподілу температур по перетину огорожувальних конструкцій при розташуванні утеплювача зовні і всередині огорожі. Згідно рис. 2.5, при розташуванні утеплювача ближче до зовнішньої сторони огорожувальної конструкції її внутрішня масивна частина накопичує тепло. При розташуванні утеплювача ближче до внутрішньої частини стіни, її масивна несуча частина знаходиться в зоні низьких температур, що створює умови для замерзання і відтавання вологи, проникаючої в стіну з косими дощами і при паропроникненості зсередини.

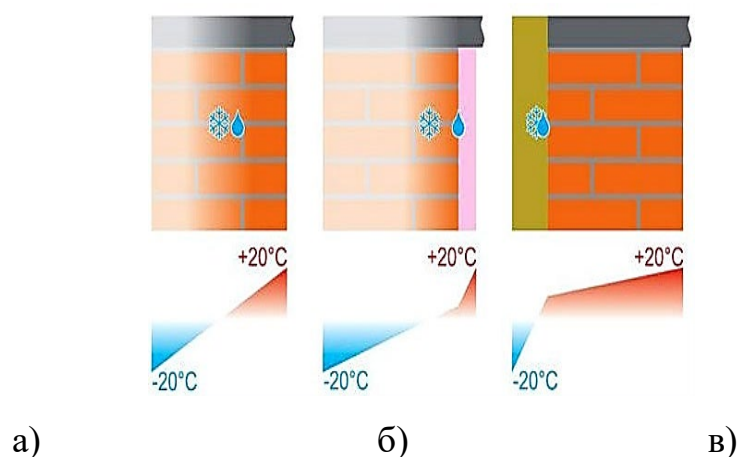


Рис. 2.5 Схема розподілу температури по товщині стіни без утеплення (а) та при утепленні її зсередини (б) та ззовні (в)

Таким чином, графік розподілу температури в огороженні відбувається за лінійним законом та має характер ламаної лінії, відрізки якої, що проходять через шари з більш високим термічним опором, мають більший кут нахилу до горизонту.

2.3. Класифікація теплоізолюваних стінових конструкцій за видом теплоізоляційного матеріалу

Одним з головних способів підвищення рівня теплового захисту будівлі є використання ефективної теплоізоляції. Утеплення зовнішніх стін суттєво впливає на загальне споживання теплової енергії у будинку лише за умови комплексної термомодернізації всього будинку. Тому знання про сучасні теплоізоляційні матеріали, головним напрямком яких використання є скорочення витрат тепла через самі конструкції, дає змогу для обрання найбільш енергоефективного матеріалу для утеплення будівлі.

Конструкція додаткового теплозахисту в період експлуатації зазнає зовнішніх і внутрішніх впливів. До зовнішнього впливу відносять сонячну радіацію, атмосферні опади, змінні температури, вологість повітря, звукові хвилі, повітряний потік, гази, хімічні речовини, біологічні шкідники. До внутрішніх – силові навантаження (постійні, тимчасові та короткочасні), коливання температури, вологість, морозне обдимання і сейсмічні хвилі. Правильна і довгострокова робота теплозахисту будівлі забезпечується в тому разі, якщо він буде здатний протистояти даним впливам та відповідати конструктивним і технологічним вимогам.

Теплоізоляційний матеріал для утеплення будівлі зберігає тепло, втримуючи в собі повітря в нерухомому стані, завдяки його комірчастій структурі, яка характеризується різною щільністю. Чим щільніший за такою структурою матеріал, тим менш рухливе повітря в ньому. За дуже низької щільності комірчастої структури матеріалу різко зростає повітрообмін і тепло виходить з утеплювача. Крім того, зі зменшенням щільності зростає стисливість матеріалу і зменшується термін служби теплоізоляції.

Використання того чи іншого конкретного матеріалу для теплозахисту стін залежить від цілої низки визначальних чинників, серед яких: довговічність, необхідна товщина шару теплоізоляції, технологічна прийнятність розміщення матеріалу на стіні, маса теплоізоляційної конструкції, вартість матеріалу, трудомісткість, можливість транспортування матеріалу на будівельний майданчик.

З розвитком нових технологій, сучасні ізоляційні матеріали стали більш ефективними, екологічно безпечними і різноманітними, і відповідають конкретним технічним завданням будівництва, серед яких зменшення товщини огорожувальних конструкцій, а також економії паливно-енергетичних ресурсів при забезпеченні в приміщеннях нормального мікроклімату.

Критеріями надійності утеплювачів є показники, що визначають надійність всієї конструкції по збереженню теплозахисних характеристик в умовах експлуатації протягом заданого періоду часу. Номенклатура показників якості та узагальнені технічні вимоги до фізико-технічних показників якості теплоізоляційних матеріалів регламентуються відповідними нормативними документами ДСТУ Б В.2.7-195:2009 «Матеріали і вироби теплоізоляційні. Номенклатура показників» та ДСТУ Б В.2.6-189:2013 «Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель». ДСТУ Б В.2.6-189:2013 містить методичні рекомендації щодо вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення житлових, громадських та промислових будівель під час проектування нового будівництва, реконструкції, капітального ремонту, термомодернізації та технічного переоснащення. До основних теплофізичних характеристик теплоізоляційних матеріалів відносять: теплопровідність, теплоємність, температуростійкість, вологість, паропроникність та ін. [71].

Волога має значний вплив на властивості теплоізоляційних матеріалів, зокрема на їх теплопровідність та механічну міцність. Мінеральна та базальтова вати зазвичай не дуже чутливі до вологості, і їх теплоізоляційні властивості практично не змінюються при збільшенні вологості. У той же час, синтетичні полімерні матеріали, такі як пінопласт, пінополіуретан та піноскло, можуть значно збільшувати свою теплопровідність при збільшенні вологості. Чим вище у матеріалу ступінь захисту від вологи, тим вища його стійкість до біологічних процесів, тому утеплювач повинен мати захист від цих впливів [71]. Високопориста будова теплоізоляційних матеріалів сприяє проникненню в них рідин, газів і парів, що знаходяться в навколишньому середовищі.

Ще одним важливим фактором, який може впливати на властивості теплоізоляційних матеріалів є температура. Зазвичай, при збільшенні температури, теплопровідність теплоізоляційних матеріалів збільшується, що призводить до погіршення їх теплоізоляційних властивостей. Однак, мінеральні вати та базальтова вата можуть зберігати свої теплоізоляційні властивості при високих температурах. Також, на властивості теплоізоляційних матеріалів можуть впливати механічні навантаження. Наприклад, у разі пінопласту надмірне механічне навантаження може призвести до пошкодження структури матеріалу, що зменшить його газопроникність та теплоізоляційні властивості. При зниженні механічної міцності матеріалу можуть погіршуватись його звукоізоляційні та вогнестійкі властивості.

Величина коефіцієнта теплопровідності для одного й того ж матеріалу не є постійною величиною і залежить від його вологості, температури та напрямку теплового потоку. Низька теплопровідність всіх теплоізоляційних матеріалів обумовлена наявністю в ній пор, що заповнені повітрям. Як приклад, на рис. 2.6 наведені графіки залежності коефіцієнта теплопровідності мінеральної вати від вологості за різними джерелами.

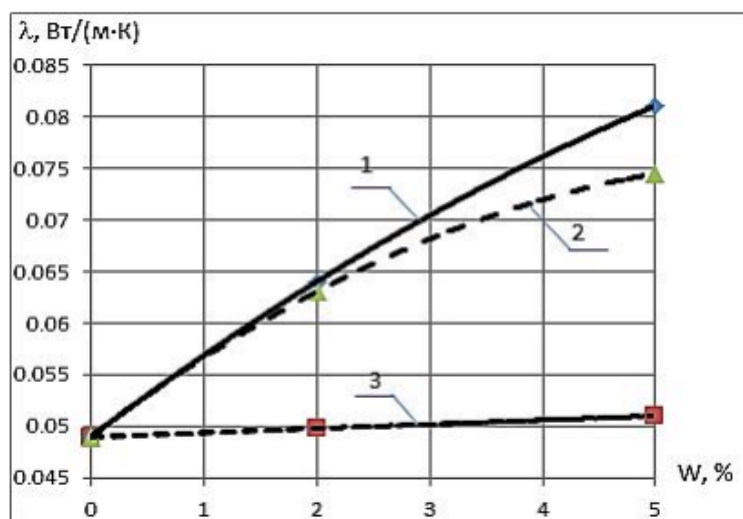


Рис. 2.6 Залежність коефіцієнта теплопровідності мінеральної вати від вологості за: 1 – ДБН В.2.6-31:2006; 2 – ISO/FDIS 10456:2007(E)

Теплопровідність будівельних матеріалів зростає при підвищенні температури, що пов'язано зі збільшенням кінетичної енергії молекул основи матеріалу. Крім цього при збільшенні температури також зростає теплопровідність повітря, що знаходиться в порах будівельних матеріалів, а також інтенсивність передачі тепла в порах матеріалу випромінюванням (рис. 2.7).

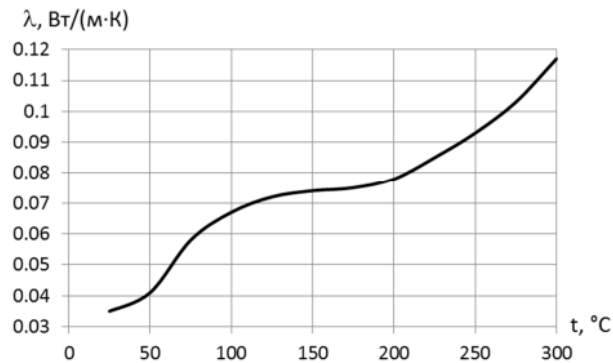


Рис. 2.7 Залежність теплопровідності мінераловатних матів від температури

Зміна теплопровідності внаслідок коливань температури має невелике значення в будівельній практиці, тому що перепади температур при експлуатації конструкцій не перевищують 100°C. При застосуванні ж будівельних матеріалів для теплоізоляції поверхонь, що мають високу температуру, вплив температури на коефіцієнт теплопровідності доводиться враховувати.

При експлуатації, теплоізоляційні матеріали зазнають пошкодження – м'які матеріали можуть зморщуватися або просідати з часом, особливо це стосується ізоляції вертикальних стін і даху, або ізоляції у горизонтальному положенні з сипучих матеріалів чи вовни.

Не менш важливим завданням є збереження початкової товщини ізоляційного шару протягом всього терміну служби конструкції, стабільність геометричних розмірів і форми при заданій вологості і температурі. Для навантажених теплоізоляційних шарів, безумовно, найважливішими критеріями надійності є міцності і деформаційні показники.

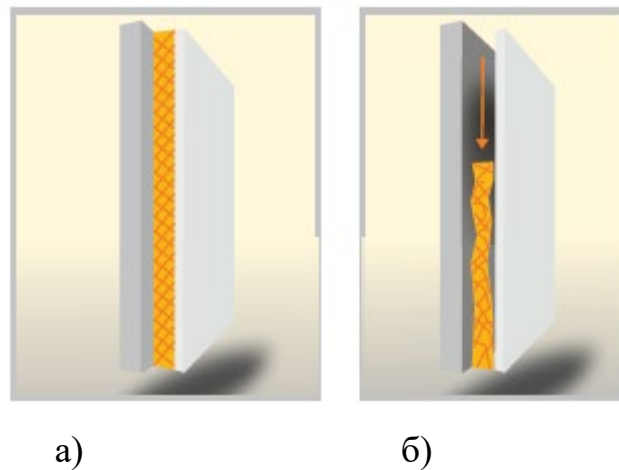


Рис. 2.8 Пошкодження теплоізоляційних матеріалів

а) нова суцільна ізоляція; б) непридатна до використання ізоляція

На теперішній час жоден з запропонованих на вітчизняному ринку матеріалів не задовольняє всім переліченим якостям та немає єдиної методики оцінки техніко-економічної ефективності чинних чи проєктуючих огорожувальних конструкцій будівель. Більш того, синтетичні вироби та мінеральні теплоізоляційні вироби на фенол-формальдегідних в'язучих в процесі тривалої експлуатації шкідливо впливають на організм людини, а в періоди пожеж призводять до отруєння газоподібними продуктами термічного розкладання. Встановлено, що довговічність класичних утеплювачів у більшості випадків не перевищує декілька років. Розтин огорожувальних стінових конструкцій показує, що накопичена за опалювальний період волога, коли замерзає, розриває волокна утеплювача. Більше того, класична теплоізоляція стає місцем розповсюдження грибка, бактерій, паразитів.

2.3.1. Теплоізоляційні матеріали на основі мінеральних волокон

Теплоізоляційні матеріали на основі мінеральних волокон є одними з найбільш поширених матеріалів для теплоізоляції будівель. Основними матеріалами цієї групи є мінеральна вата, скловата та базальтова вата.

Мінеральна вата являє собою надтонкі волокна, що отримуються з розплавів гірських порід, металургійних шлаків або звичайного скла, які зберігають форму

завдяки сполучній речовині (рис. 2.9). Провідні світові виробники мінеральної вати як сировину використовують виключно гірські породи, що дає змогу отримувати продукцію вищої якості з тривалим періодом експлуатації. В Україні базальтових порід, необхідних для виробництва базальтової вати, особливо багато в Рівненській області [71].

Основною властивістю мінеральної вати є негорючість у поєднанні з високою тепло- та звукоізоляційною здатністю, стійкістю до температурних деформацій, негігроскопічністю, хімічною та біологічною стійкістю, екологічністю та простотою монтажу. Вона також характеризується добрими звукоізоляційними властивостями.

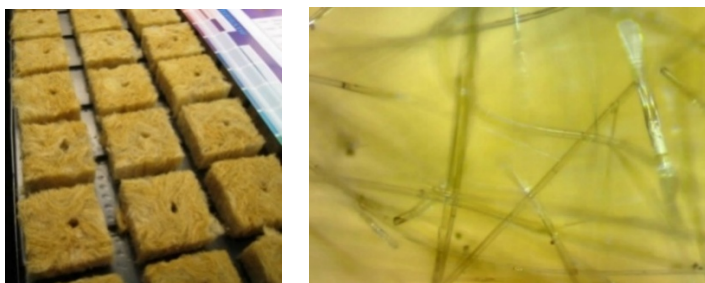


Рис. 2.9 Мінеральна вата

а) зовнішній вид; б) вид під мікроскопом

Мінеральні волокна витримують температуру понад 1000°C . Важливим параметром мінераловатних матеріалів є здатність до збереження своїх розмірних характеристик протягом всього періоду експлуатації, це запобігає утворенню містків холоду на стиках ізоляційних плит [71].

Скловата – волокнистий мінеральний теплоізоляційний матеріал, різновид мінеральної вати, з безладно сплутаних скляних волокон (Рис. 2.10). Теплоізоляційний матеріал характеризується високою хімічною стійкістю, високими звукоізоляційними властивостями завдяки волокнистій структурі та практично не містить неволокнистих включень.

Вироби із скловати можуть бути вкриті алюмінієвою фольгою, склотканиною, різними нетканими матеріалами тощо. Утеплювач зі скловати – негорючий матеріал та під впливом вогню не виділяє токсичні та шкідливі речовини. Завдяки

спеціальній обробці і відсутності запаху відбувається запобігання появи шкідників і цвілі в будівельних конструкціях. Теплоізоляційні вироби з нього характеризуються стабільністю форми та довговічністю [81].

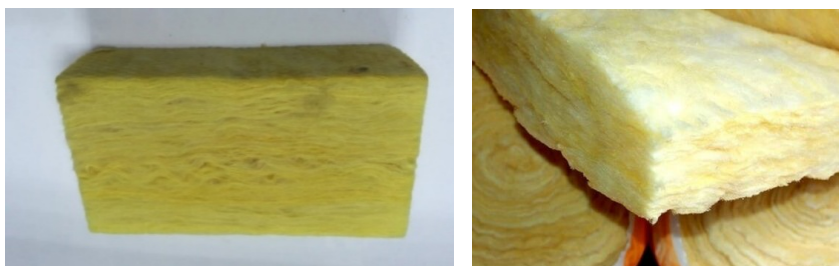


Рис. 2.10 Утеплювач зі скловати

Базальтова вата, як будівельний матеріал, виготовляється на основі базальтових волокон. Виробництво базальтової вати полягає в переплавленні базальтової породи при температурі 1500°C, після чого в центрифугі волокна роздуваються і спресовуються в плити. Для того, щоб вони трималися між собою, додається сполучний матеріал. Використовується в якості тепло- та звукоізоляції горизонтальних, вертикальних та нахилених будівельних конструкцій всіх типів будівлі та в системах зовнішнього утеплення штукатурного (рис 2.11).



Рис. 2.11 Утеплювач з базальтових волокон

Базальтова вата може бути виготовлена у вигляді плит або рулонів, залежно від потреби застосування та може використовуватися для теплоізоляції стін, підлоги, дахів, трубопроводів та інших елементів будівельної конструкції. Даний матеріал відрізняється високими теплоізоляційними показниками, які забезпечуються низькою теплопровідністю самих волокон. Для базальтової вати властивий тривалий термін експлуатації. Утеплювач не підтримує горіння і не виділяє токсичні речовини при нагріванні, має хороші звукоізоляційні і фільтруючі

властивості високу вібростійкість і стійкість до агресивних середовищ. Так як він виготовляється з природного матеріалу, він безпечний для здоров'я та навколишнього середовища.

2.3.2. Теплоізоляційні матеріали на основі синтетичних полімерів

Пінополістирол – один з найбільш розповсюджених матеріалів, що використовується для теплоізоляції зовнішніх поверхонь огорожувальних конструкцій та одержується шляхом спінення полістиролу [82, 83]. До 98 % його об'єму складає повітря, що пояснює його відмінні теплоізоляційні і звукоізоляційні властивості. Важливою перевагою пінополістиролу є практично повна відсутність водопоглинення, він є довговічним і не піддається біологічному розкладанню. Плити з цього матеріалу мають невелику масу та зручні в кріпленні. Пінополістирол дуже легкий і має хороші характеристики міцності (міцність на розрив – 80, на стиск – 130 кПа), тому його вважають більш технологічним. Його недоліки: низькі звукоізоляційні властивості, низький коефіцієнт паропроникності, нестійкий до впливу багатьох органічних розчинників. Низькі температури не впливають на фізико-технічні властивості пінополістиролу, він зберігає свою форму й при тривалому нагріванні до 90 °С.

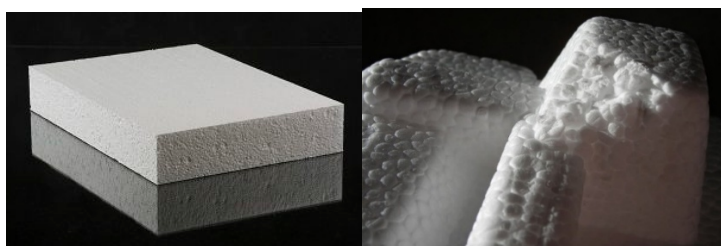


Рис. 2.12 Утеплювач пінополістирол

Високі теплозахисні характеристики матеріалу мінімізують ризик руйнівного впливу циклів заморожування-розморожування, що запобігає утворенню тріщин у несучих елементах та подовжує строк їх експлуатації. Використання пінополістиролу у зовнішніх огорожувальних конструкціях забезпечує низьку питому вагу, що дозволяє уникнути додаткових витрат на посилення фундаментів

під час реконструкції чи надбудови будівель, а також суттєво скорочує витрати при новому будівництві.

Екструдований пінополістирол – вискоефективний теплоізоляційний матеріал для різних типів будівельних конструкцій (рис. 2.13) та виготовляється з гранул полістиролу шляхом нагрівання та екструзії. Екструзійний пінополістирол (ЕПП) має однорідну чарункову структуру, яка надає матеріалу низької теплопровідності і високої міцності, робить матеріал паронепроникним. Повна закритість чарунок забезпечує абсолютну водонепроникність матеріалу. Саме тому цей матеріал рекомендується для використання при утепленні в умовах підвищеної вологості або можливого частого контакту з водою. ЕПП також характеризується високою стійкістю до деформацій стиснення, і тому може використовуватися для утеплення поверхонь, що несуть навантаження. Матеріал витримує різкі і постійні температурні перепади. Нормальний температурний діапазон – від -120 до +75 градусів.

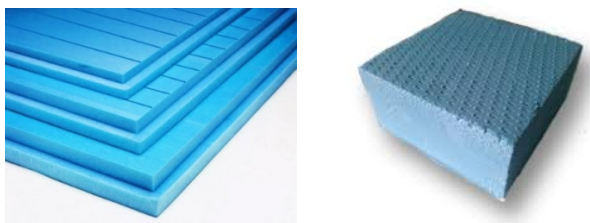


Рис. 2.13 Екструзійний пінополістирол

Недоліком екструзійного пінополістиролу є його руйнування при контакті з деякими хімічними речовинами та горючість.

Пінополіуретан (ППУ) – це різновид газонаповнених пластмас. За хімічним складом це пластмаса, отримана в ході термореактивної хімічної реакції, де до 5-10% – твердий полімер, а решта складу – інертні гази. Залежно від виду вихідного поліуретану може бути жорстким або еластичним. Пінополіуретан відноситься до групи легких, але досить міцних матеріалів, має дуже низьку теплопровідність та малу паропроникність. Пінополіуретан може бути виготовлений у вигляді плит, блоків або вставок. ППУ є одним із найбільш ефективних теплоізоляційних матеріалів завдяки своїй високій теплоізоляційній здатності та низькій

теплопровідності. Він також відомий своєю водостійкістю та механічною міцністю.

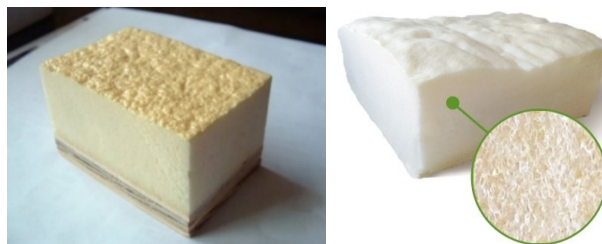


Рис. 2.14 Пінополіуретан

Даний теплоізоляційний матеріал достатньо простий у використанні, тому має широку вживаність в будівельній галузі. Низька теплопровідність матеріалу дозволяє зменшити енерговитрати на опалення будинку взимку і кондиціонування – влітку. Завдяки технології напилення, пінополіуретан покриває поверхні будь-якої складності, форми та конфігурації, що дозволяє отримати покриття без стиків, щілин та порожнин, додатково забезпечуючи хороший рівень термо-, гідро- та шумоізоляції. Так як має ППУ має високий ступінь зчеплення з різними будівельними матеріалами (цегла, метал, деревина) він використовується для теплоізоляції промислових і цивільних будівель і приміщень, для теплоізоляції і ущільнення віконних і дверних отворів, а також для теплоізоляції трубопроводів різного призначення. Недоліком пінополіуретану вважається його горючість та низька стійкість до дії ультрафіолетового випромінювання, так як під дією ультрафіолетових променів починається його деструкція, тому доцільно його покривати шаром вододисперсійної фарби [83].

Піноскло – унікальний теплоізоляційний матеріал пористої структури та виготовляється із застосуванням порошкової технології, досить простого, але трудомісткого процесу. Сировиною для виробництва служить суміш розмеленого скляного бою з газоутворювачем. Сировинну суміш засипають у форми з жаротривкої сталі і нагрівають в тунельних печах до 900 °С, при цьому відбувається плавлення частинок і розкладання газоутворювача. При згоранні виділяються гази, що вспінюють скломасу, яка при охолодженні перетворюється в міцний матеріал пористої структури (Рис. 2.15).

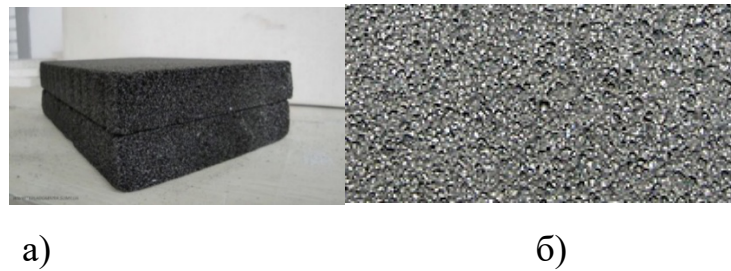


Рис. 2.15 Піноскло: а) загальний вид; б) чарункова структура в розрізі

Піноскло немає санітарних і гігієнічних обмежень та стійке до значних перепадів температур. Нині є два види піноскла – гранульоване та блочне. За теплотехнічними властивостями блочне піноскло має перевагу, але через порівняно низьку вартість частіше використовують гранульований утеплювач. До основних переваг варто віднести його негорючість, водонепроникність, стійкість до органічних розчинників і кислот. Також утеплювач виключно екологічний і санітарно безпечний, не виділяє шкідливих речовин та характеризується біологічною стійкістю. Сфера застосування даного утеплювача дуже широка. Піноскло, незважаючи на свою міцність, є вельми крихким, що призводить до розтріскування, якщо ігнорувати рекомендації по монтажу [84].

2.3.3. Інші теплоізоляційні матеріали

Перліт – це природний теплоізоляційний матеріал, який виготовляється з переробленого вулканічного скла (Рис. 2.16) та має дуже низьку теплопровідність, що робить його ефективним ізоляційним матеріалом. Перліт виготовляється шляхом нагрівання природного вулканічного скла до дуже високої температури, при якій воно розривається на дрібні частинки. Ці частинки обробляються, щоб вони стали легкими та пухнастими, після чого їх використовують для виготовлення теплоізоляційних матеріалів.



Рис. 2.16 Перліт

Однією з головних переваг перліту є його вогнестійкість, тому він використовується для теплоізоляції будівель з високими вимогами до пожежної безпеки. Також матеріал вологостійкий, що дозволяє йому використовуватись в умовах підвищеної вологості та не піддається різним формам руйнування, які можуть виникнути в умовах вологості. Перліт також має високу звукоізоляційну властивість, що дозволяє використовувати його для тепло- та звукоізоляції будівельних конструкцій [85].

У сучасному будівництві все більшого поширення набувають екологічні теплоізоляційні матеріали, виготовлені з відновлюваної сировини, такі як целюлозні утеплювачі, деревоволокнисті плити та матеріали на основі льону або конопель. Вони поєднують достатні теплоізоляційні властивості з високою паропроникністю та низьким екологічним слідом, проте потребують захисту від вологи та біологічного впливу.

Перспективним напрямом розвитку теплоізоляційних матеріалів є використання високоефективних наноструктурованих матеріалів, зокрема аерогелів і вакуумних теплоізоляційних панелей. Такі матеріали мають надзвичайно низький коефіцієнт теплопровідності, що дозволяє значно зменшити товщину теплоізоляційного шару. Водночас їх застосування наразі обмежене складністю монтажу та високою вартістю.

Таким чином, сучасний ринок теплоізоляційних матеріалів характеризується широким різноманіттям рішень, що дозволяє обирати оптимальний матеріал залежно від конструктивних особливостей стінових конструкцій, кліматичних умов та вимог до енергоефективності будівель.

На сьогодні найбільш поширеними під час установаження додаткової теплоізоляції є полімерні матеріали (пінополістирол, пінополіуретан) та вироби з мінеральної вати і скловолкна; в разі виконання теплоізоляції з цих матеріалів маса всієї конструкції теплозахисту буде найменшою.

В таблиці наведені основні технічні характеристики перерахованих матеріалів.

Таблиця 2.1 Порівняльні характеристики теплоізоляційних матеріалів

Теплоізоляційний матеріал	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К	Густина, кг/м ³	Водопоглинання, % від власної ваги	Технологічність
Мінеральна вата	0,032-0,045	10-150	1-5	Клейове, механічне, комбіноване кріплення, система «сухого монтажу», технологія «мокрого фасаду»
Скловата	0,030-0,044	10-200	0,2-2	Клейовий спосіб, механічний спосіб, комбінований спосіб
Базальтова вата	0,030-0,045	25-200	<1	Механічний, клейовий спосіб, каркасна система, шурупи,
Пінопласт	0,030-0,040	15-35	5	Клейове та механічне (дюбелі, шурупи, гвинти) кріплення
Екструдований пінополістирол	0,032-0,045	15-30	<1	Клейове та механічне кріплення
Пінополіуретан	0,022-0,035	25-50	2-10	Розпилення, заливка, вкладання
Піноскло	0,045	120	1,5	Клейове, механічне (саморізи, гвинти, анкери) та комбіноване кріплення
Перліт	0,071-0,110	250-450	25	Клейове кріплення, кріплення за допомогою механічних кріплень (гвинти), металевих конструкцій, «мокрый фасад»

2.4. Аналіз ринку теплоізоляційних матеріалів України

На ринку теплоізоляційних матеріалів представлена велика кількість різних ефективних матеріалів, конструкцій і утеплювачів, рекомендованих до використання в якості теплоізоляційних матеріалів для зовнішнього утеплення огорожувальних конструкцій. Розширення будівельної галузі, збільшення обсягів будівництва та модернізації наявних будівель, а також підвищення уваги до енергоефективності, ведуть до зростання попиту на теплоізоляційні матеріали.

За підсумками Державної служби статистики України, на рис. 2.17 наведено обсяги виробництва теплоізоляційних матеріалів в Україні в період 2013-2021 рр.

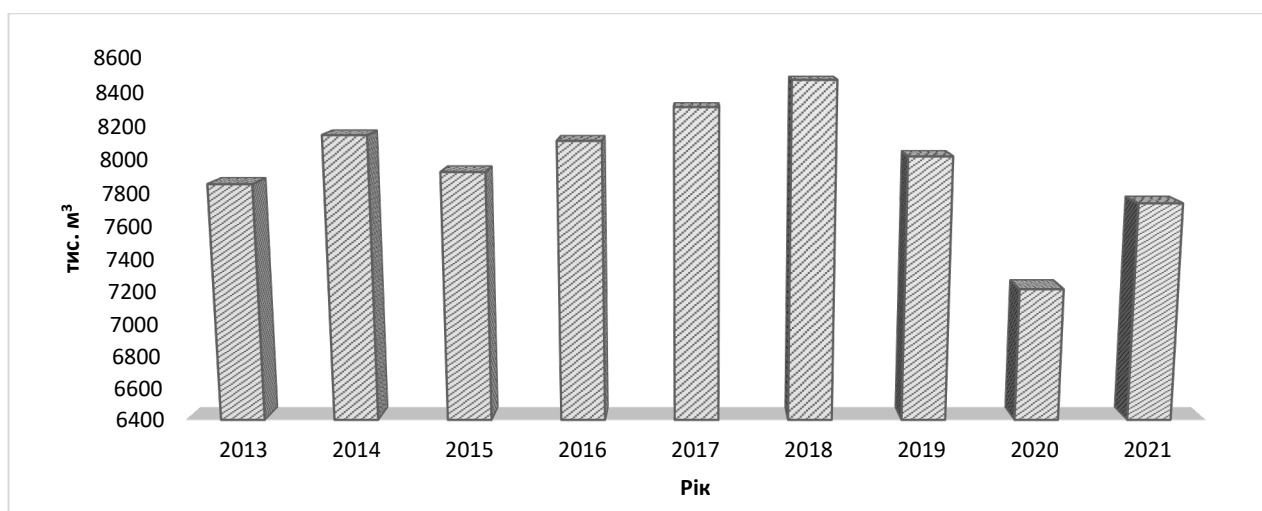


Рис. 2.17 Виробництво теплоізоляційних матеріалів в Україні в період 2013-2021 рр.

Динаміка виробництва теплоізоляційних матеріалів в Україні свідчить про збільшення обсягів виробництва та попиту на ці матеріали в останні роки. За даними Державної служби статистики України [86], загальний обсяг виробництва теплоізоляційних матеріалів в Україні збільшувався з 2015 р. і досяг максимального рівня у 2018 р, але в другій половині 2018 р. почалося зниження його обсягу. У 2019 р. виробництво зменшилося на 9,7 %, у 2020 р. відбувся спад виробництва через кризову ситуацію, викликану пандемією COVID-19 та зменшенням попиту на будівельні матеріали. Так, у 2020 р. обсяг виробництва зменшився на 10% порівняно з 2019 р. Однак, за даними [86], обсяг виробництва теплоізоляційних матеріалів у 2021 р. став на 7,2% більше, ніж у 2020 р. Зокрема, виробництво мінеральної вати збільшилося на 4,4%, пінопласту – на 10,8%, а пінополіуретану – на 19,1%. Таким чином, за останні роки ринок теплоізоляційних матеріалів в Україні досить динамічно розвивався, збільшуючи обсяги виробництва та споживання, а також підвищуючи якість виробів та впроваджуючи нові технології. Проте, він зазнав впливу певних факторів, які потребують уваги та подальшого вивчення, зокрема недостатньої уваги до впровадження енергоефективних технологій в будівництві та досить високої конкуренції на ринку.

Щодо споживання теплоізоляційних матеріалів в Україні, то за останні п'ять років відзначається стабільний ріст. За період з 2017 по 2021 рік, обсяг споживання

теплоізоляційних матеріалів збільшився майже на 40%, з 126,5 тис. тонн до 177,1 тис. тонн.

Ринок теплоізоляційних матеріалів України насичений товарами як вітчизняного так і закордонного виробництва. У загальній структурі ринку теплоізоляційних матеріалів імпорт займає 30-35%. Але в сегментному розрізі ця картина виглядає по-різному: скловолокно для теплоізоляції представлено винятковою імпортною продукцією, а для екструдованого пінополістиролу імпорт становить близько 10%.

У структурі виробництва теплоізоляційних матеріалів переважає виробництво мінеральної вати (скловата та кам'яна вата), пінополістиролу (ППС) та екструдованого пінополістиролу (ЕППС) (Рис. 2.18).

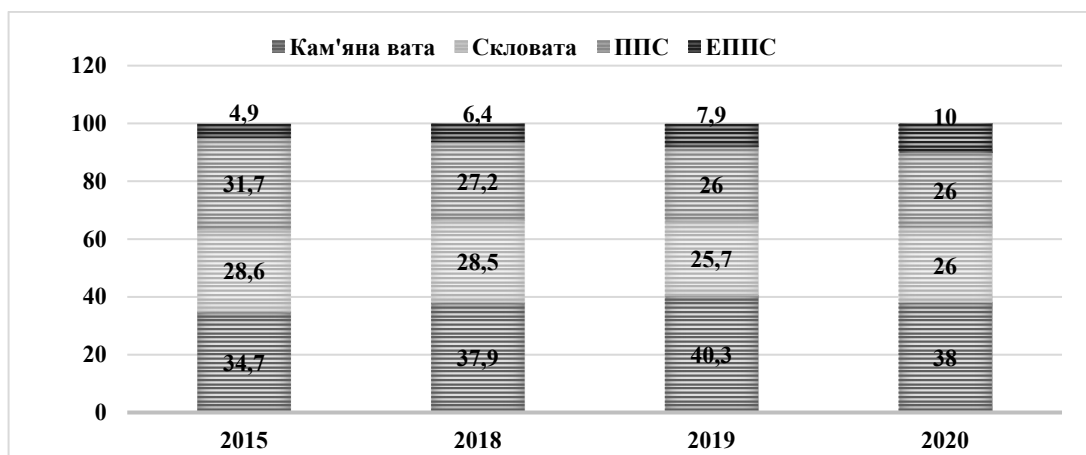


Рис. 2.18 Основні сегменти ринку теплоізоляційних матеріалів

Провідними сегментами ринку є кам'яна вата та пінополістирол, що зумовлено їх високими теплоізоляційними властивостями та досить низькою ціною в порівнянні з іншими видами теплоізоляційних матеріалів. Сегменти кам'яної вати та пінополістиролу представлені переважно вітчизняною продукцією, в той час як всі інші – закордонного виробництва. Беручи до уваги динаміку ринку та нарощення вітчизняного виробництва, частка імпортової ізоляції поступово зменшувалась.

Згідно розподілу, найбільшим сегментом стабільно є кам'яна вата (рис. 2.15 а). В Україні є великі підприємства з виробництва кам'яної вати, виробничі потужності яких у перспективі можуть на 100% задовольнити внутрішнє

виробництво (для прикладу, завод «Техно») [88]. Шляхом збільшення внутрішнього виробництва, експортного постачання та заміщення імпорту інших матеріалів у 2019 р. темп приросту виробництва кам'яної вати в Україні становив 30%, а обсяги виробництва кам'яної вати значно менші, ніж обсяги споживання теплоізоляційних матеріалів, що свідчить про те, що частка імпорту кам'яної вати в Україні є значною.

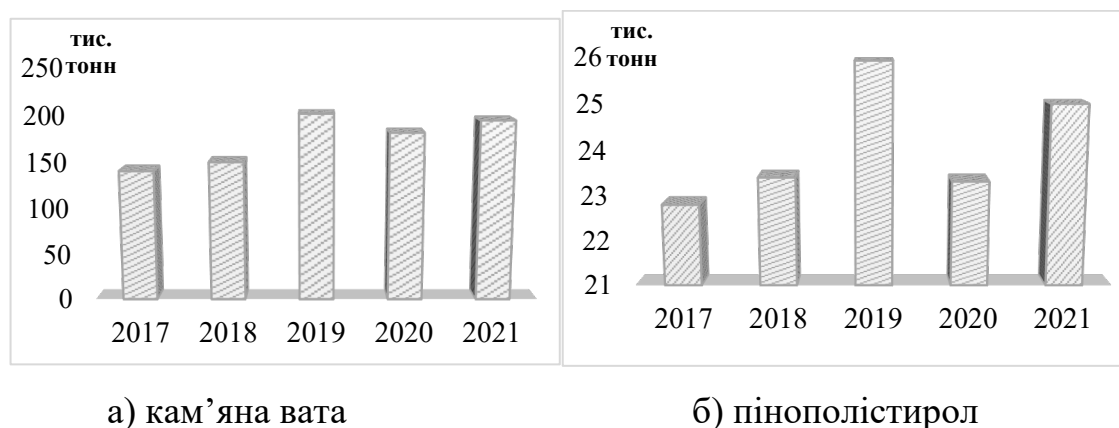


Рис. 2.19 Об'єми та динаміка виробництва за 2017-2021 рр.

Якщо розглядати пінополістирол, то в Україні існує більше 20 підприємств їх виробництва, проте через залежність від імпорту первинних гранул з 2016 р. їхня кількість зменшилася. Частка полімерних матеріалів становить майже 30-35% ринку теплоізоляційних матеріалів України [1]. Як видно з графіку (рис. 2.19 б), у 2017 р. помітно тенденцію зростання обсягів виробництва полімерних теплоізоляційних матеріалів, а протягом 2019 р. виробництво пінополістиролу збільшилося на 10% через доступність сировини та збільшення експортного потенціалу. Отже, за останні 5 років виробництво пінополістиролу в Україні зросло на 12,9%, що може бути пов'язано зі збільшенням попиту на цей матеріал в будівельній галузі, а також зі збільшенням інвестицій в цей сектор. Варто зазначити, що обсяги виробництва пінополістиролу в Україні значно менші, ніж обсяги споживання теплоізоляційних матеріалів, що свідчить про те, що частка імпорту пінополістиролу в Україні є значною.

Сектор полімерних теплоізоляційних матеріалів є інвестиційно привабливим як для вітчизняних, так і закордонних інвесторів. Це зумовлюється покращенням

макроекономічної ситуації в Україні, наявністю сировинної бази, розвитком сектору торгівлі будівельними матеріалами та зростанням обсягів капітального будівництва. Проте кількість інвесторів та обсяги інвестицій усе ще недостатні, що спричинено недосконалістю обладнання підприємств, що існують.

В Україні скловолокно для теплоізоляції представлено винятковою імпортною продукцією, тому ринок скловати залежить від кон'юнктури ринку за кордоном.

Однак, ринок має ряд проблем, серед яких: низька якість теплоізоляційних матеріалів, яка може призвести до зниження їх ефективності та збільшення витрат на опалення; відсутність необхідних сертифікатів якості у більшості виробників, що створює загрозу для здоров'я та безпеки споживачів; залежність від імпорту теплоізоляційних матеріалів, що в подальшому, призводить до підвищення їх вартості та зниження конкурентоспроможності національних виробників; проблема з розповсюдженням та доступністю вітчизняних теплоізоляційних матеріалів на ринку, яка пов'язана зі складнощами, пов'язаними з їх виробництвом та транспортуванням; наявність дешевих імпортних аналогів, які конкурують з вітчизняними виробниками. Через високий технологічний рівень потужностей закордонних виробників, середні ціни на теплоізоляційні матеріали закордонного походження вищі за вартість продукції вітчизняного виробника.

В цілому, ринок теплоізоляційних матеріалів в Україні є перспективним і має потенціал для подальшого розвитку. На сучасному етапі розвитку будівельної галузі України спостерігається зростаючий інтерес до теплоізоляційних матеріалів, що зумовлено посиленням вимог до енергоефективності будівель та зменшенням втрат тепла. Одним з основних трендів є збільшення виробництва теплоізоляційних матеріалів на основі мінеральної вати та пінополіуретану, що зумовлено їх високими теплоізоляційними властивостями та досить низькою ціною в порівнянні з іншими видами теплоізоляційних матеріалів. За останні роки на ринку спостерігається зростання інтересу до екологічно чистих теплоізоляційних матеріалів, що вготовляються на основі відходів промисловості та сільського господарства.

Отже, можна стверджувати, що ринок теплоізоляційних матеріалів України продовжує зростати та розвиватися, збільшуючи виробництво та споживання теплоізоляційних матеріалів, розширюючи асортимент та вдосконалюючи технології виробництва.

2.5. Конструктивні рішення для підвищення енергоефективності стін

Сучасні системи утеплення передбачають створення комплексної захисної термооболонки навколо огорожувальних конструкцій будівлі. Така оболонка, що влаштовується на фасадних системах, переносить зону позитивних температур в несучі конструкції будівлі. Цей комплекс заходів виключає появу «містків холоду», підвищує тепловий опір ОК та запобігає випаданню конденсату, що негативно впливає на теплоізолюючі та інші експлуатаційні характеристики будівельних конструкцій.

Такі конструкції складаються з наступних елементів (рис. 2.20):

- 1) основний теплоізоляційний;
- 2) покривний шар – захищає основний теплоізоляційний шар від атмосферних опадів, механічних пошкоджень, впливу агресивних середовищ;
- 3) пароізоляційний шар – захищає ізоляційну конструкцію від проникнення парів води з навколишнього повітря або через захисну конструкцію;
- 4) кріпильні деталі – застосовуються для кріплення теплоізоляційних матеріалів і покривних шарів та для підвищення міцності конструкції в цілому

Для режиму теплопередачі основними є конструктивний і теплоізоляційний шари.

Згідно [22] зовнішні стіни з фасадною теплоізоляцією класифікують за такими конструктивними ознаками:

- конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та опорядженням штукатуркою та дрібно штучними виробами;
- конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та опорядженням цеглою;

- конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією з вентиляльованим повітряним прошарком та опорядженням індустріальними елементами;
- конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та опорядженням прозорими елементами..

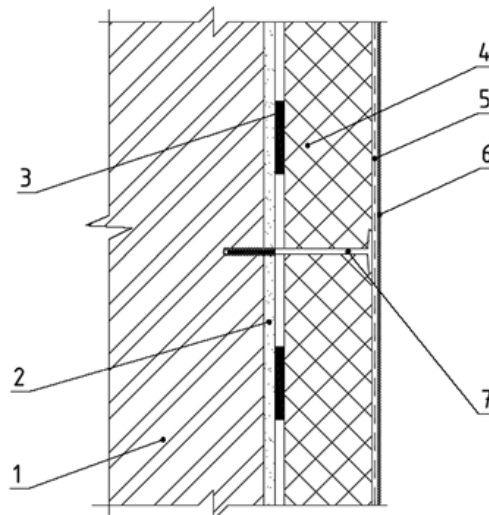


Рис. 2.20 Конструктивна схема

1 – стіна; 2 – вирівнюваний шар; 3 – клейовий шар; 4 – ізоляція;
5 – захисний шар; 6 – опоряджувальне покриття; 7 – кріплення

Вибір технологічного методу нанесення теплоізоляційного і захисно-декоративного шарів характеризується трьома основними ознаками:

- за походженням компонентів, які входять до їх складу (органічні, неорганічні);
- за умовами виготовлення (будівельні, серійні заводські);
- за способами кріплення (механічні, клейові, комбіновані та пошарове нанесення).

Зрозуміло, що кожна з цих систем має свої переваги та недоліки, а також найбільш раціональну сферу застосування. Тому використання цих технічних рішень має бути всебічно обґрунтованим.

В Україні одними з конструктивних рішень теплосективних зовнішніх стін, що відповідають новим нормативам по теплозахисту огорожувальних конструкцій, є фасадна теплоізоляція з опорядженням штукатурками та фасадна теплоізоляція з вентиляльованим повітряним прошарком [68].

2.5.1 Конструкційна схема зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та опорядженням штукатуркою (метод скріпленої теплової ізоляції)

Технічне рішення цієї системи передбачає клейове або механічне закріплення утеплювача до існуючої стіни за допомогою анкерів, дюбелів і дротяних каркасів з наступним покриттям захисними шарами. Плити монтуються так, щоб між ними практично не було проміжків. У результаті утворюється суцільна й рівномірна теплова оболонка без містків холоду. В залежності від штукатурного шару застосовуються два види систем кріплення: жорстке кріплення до стіни за допомогою анкерів і гнучке кріплення за допомогою шарнірних або пересувних кронштейнів. Конструктивна схема фасадної теплоізоляції зі штукатурним шаром наведена на рис. 2.21.

В ролі утеплювача застосовуються плити з мінеральної вати або пінополістиролу. Важлива властивість утеплювача – його водопоглинання, яке не повинно перевищувати 1-1,5% обсягу матеріалу, оскільки надмірна вологість шару утеплювача призводить до її викривлення та втрати геометричної форми, внаслідок чого між шарами можуть утворюватися щілини, що погіршує зовнішній вигляд і скорочує міцність утеплювача [69,70].

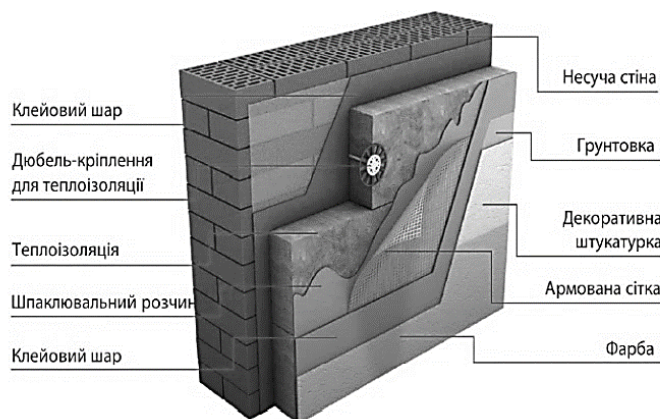


Рис. 2.21 Конструктивна схема збірної системи з опорядженням штукатурками

Третій шар – штукатурка з армувальною сіткою – використовується для забезпечення високої адгезії декоративного нашарування на утеплювач та збільшення загальної міцності фасаду. Декоративне покриття наноситься фінішним

шаром, яке виконує захисну функцію, оберігаючи утеплювач від впливу опадів, вітру, морозу, ультрафіолетових променів [71].

Будівлі, утеплені таким способом, забезпечують високий рівень температурного комфорту в приміщенні, а фасади при цьому набувають привабливого індивідуального вигляду. До переваг цієї системи можна віднести високу стійкість до сонячної радіації та вітрових навантажень.

Попри популярність системи, при монтажі та проектуванні дуже часто виникають помилки, тому необхідно відповідально підходити до вибору матеріалів для облаштування системи скріпленої теплоізоляції. Такий варіант оформлення фасаду не дозволяє помітно підвищити теплотехнічні характеристики стіни, а внаслідок нерівномірності температурно-вологісних деформацій основної стіни та покрівельного шару, теплообмінних процесів у самому покритті та неправильного застосування кріплення в залежності від товщини покрівельного шару виникає проникнення вологи, розтріскування та розшарування покриття.

2.5.2. Конструкційна схема зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією з вентиляльованим повітряним прошарком

Вентильована теплоізоляційно-опоряджувальна фасадна система — це система матеріалів та конструкцій, які встановлюються на зовнішніх стінах будинків для захисту від впливу зовнішнього середовища та утеплення з метою енергозбереження. Згідно з ДБН В.2.6-33:2018 "Конструкції зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією. Вимоги до проектування" конструкція навісного вентиляльованого фасаду повинна включати в собі металевий кріпильний каркас, теплоізоляційний шар, облицювальний матеріал, вентиляльований прошарок, який створює простір (Рис.2.22).

Вперше про вентиляльований фасад у 1849 р. описав у своїх працях Жан-Батист Жобард – у зимовий період гаряче повітря повинно циркулювати між стіною будівлі та огорожуючою конструкцією, тоді як влітку у прошарку повинно циркулювати холодне повітря [72]. Перший екземпляр такої системи з'явився у Гінгені в 1903 р. в Німеччині. Протягом 1980-х фасади такого типу отримали

переважне використання. Його здебільшого використовували через те, що через таку теплоізоляцію можна було закрити зношені фасади старих будівель, так як для цього стіни не потребували особливої підготовки [73].

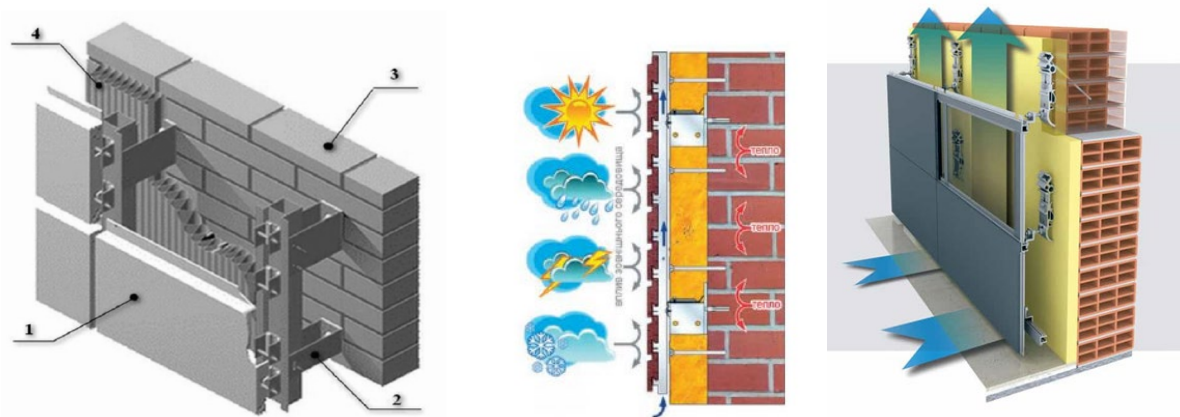


Рис. 2.22 Система з вентилятованим повітряним прошарком
1 – облицювальні панелі; 2 – каркасна система; 3 – стіна; 4 – теплоізоляційний шар

В Україні вентиляований фасад з'явився з 2002 року і зайняв потужний сегмент на українському будівельному ринку, оскільки він забезпечує високу енергоефективність будівель та їх архітектурну виразність при оптимальному використанні матеріальних і трудових ресурсів [74].

Метою даного зазору є використання потоку повітря, що створюється за рахунок різниці температур повітря зовні і всередині зазору, для видалення надлишку вологи зі структури фасаду для підтримання його в сухому стані. Потік повітря, як правило, проходить від низу до верху, через отвори, розташовані на верхній і нижній частині фасадного покриття. У результаті існує постійний рух повітря вентиляованого фасаду. Різниця температур призводить до різниці тисків, і чим більша ця різниця, тим вища швидкість повітряного потоку. Це забезпечує виведення вологи зі стін і з утеплювача. В даній системі «точка роси» зміщена з несучої стіни в теплоізоляційний шар.

Існують одно- та дворівневі вентиляовані фасади. У варіанті дворівневих вентиляованих фасадів використовується двохшарова теплоізоляція та металокаркас. Теоретично, в якості утеплювача може бути встановлений будь-який теплоізоляційний матеріал, але, головна вимога – забезпечення пропускання пари

з приміщення. Традиційні утеплювачі, типу пінополістиролу або пінопласту не відповідають цій вимозі, тому, зазвичай, перевага віддається м'яким утеплювачам – базальтовій ваті, рідше скловаті. Для використання в системі вентильованого фасаду відмінним рішенням є встановлення мінеральної вати з подвійною щільністю. Цей матеріал з одного боку володіє достатньою паропрopusкною здатністю, а з іншого, необхідним запасом жорсткості. Для облаштування зовнішнього шару застосовуються такі оздоблювальні матеріали, як: керамогранітні та гранітні плити; композитні панелі з алюмінію; фіброцементні плити; панелі з металу; сайдинг та дерево [75].

Для каркаса використовуються алюмінієві сплави, нержавіюча та оцинкована сталь [76 – 79]. Ключовими елементами в облаштуванні каркаса є кронштейни, вони з'єднують зовнішній шар з несучою стіною. При цьому, кронштейни стають основними «містками холоду» в конструкції. Крім того, під кронштейн укладається паронітова підкладка для його захисту від впливу агресивного середовища матеріалу стін.

Завдяки високотехнологічним утеплювачам, всередині будівлі створюється мікроклімат, який дозволяє заощадити на кондиціонуванні теплопостачання приміщень. Наявність вентильованого повітряного прошарку призводить до ефективного відведення вологи з конструкції стіни, в тому числі утеплювача. В результаті робота в сухому середовищі при насиченні повітрям значно підвищує теплоефективність утеплюючих елементів. Вся волога, що накопичується всередині конструкції, видалається завдяки природній вентиляції. Вентиляційні фасади виготовляються з важкогорючих або негорючих матеріалів, які не дають поширюватися полум'я у випадку пожежі. Така система стійка до деформації, а облицювальні фасадні панелі і утеплювач добре поглинають звуки.

До недоліків даної схеми відносять вартість та особливості монтажних робіт. Матеріали та монтажні роботи коштують досить дорого, але завдяки відмінним теплоізоляційним властивостям і економії тепла термін окупності короткий. Монтаж системи складний та вимагає навичок і дотримання технологій.

Порушення технології може призвести до недостатньої вентиляції та застій вологи усередині оздоблювального блоку.

На вітчизняному ринку існують різні фасадні системи з вентиляльованим повітряним прошарком для утеплення зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель. Енергоефективність вентиляльованого фасаду буде досягнута лише в тому випадку, коли буде розроблено індивідуальний розрахунок для конкретної будівлі. Адже конструктивні особливості можливо визначити лише з урахуванням усіх особливостей об'єкта, що споруджується чи підлягає реконструкції, а саме кліматична зона ділянки, конфігурація, висота будівлі та матеріали стін.

Висновки до розділу

1. У розділі проаналізовано конструктивні особливості теплоізолюваних стінових конструкцій та визначено основні підходи до забезпечення ефективного теплозахисту будівель. Показано, що значна частка тепловтрат припадає на огорожувальні конструкції, що обґрунтовує необхідність застосування сучасних теплоізоляційних рішень.
2. Встановлено, що найбільш ефективним конструктивним рішенням є використання багат шарових стінових конструкцій, які забезпечують оптимальне поєднання несучих і теплоізоляційних властивостей та врахування температурно-вологісних процесів.
3. Показано, що зовнішнє розташування теплоізоляційного шару є найбільш ефективним з точки зору підвищення теплозахисних характеристик, зменшення впливу температурних коливань і запобігання утворенню містків холоду. Внутрішня та комбінована теплоізоляція мають обмежене застосування через ризик конденсації вологи та порушення температурно-вологісного режиму.
4. Визначено, що вибір теплоізоляційного матеріалу є багатокритеріальною задачею, яка потребує врахування теплофізичних, експлуатаційних, економічних та екологічних характеристик. Показано, що жоден із сучасних

матеріалів не забезпечує повного задоволення всіх вимог, що зумовлює необхідність комплексного підходу.

5. Проаналізовано основні групи теплоізоляційних матеріалів (мінеральні, полімерні та природні), для яких встановлено залежність теплофізичних характеристик від умов експлуатації, зокрема вологості, температури та механічних навантажень.
6. Дослідження ринку теплоізоляційних матеріалів України засвідчило його динамічний розвиток, зростання обсягів виробництва та споживання, а також наявність значної частки імпоротної продукції. Виявлено проблеми, пов'язані з нерівномірною якістю матеріалів, залежністю від імпорту та недостатнім впровадженням інновацій.
7. Встановлено, що сучасні конструктивні рішення (системи фасадної теплоізоляції зі штукатурним покриттям та вентильовані фасади) забезпечують підвищення енергоефективності будівель за умови належного проектування та дотримання технології монтажу.
8. Отримані результати створюють наукову основу для подальших досліджень теплоперенесення через теплоізоляційні стінові конструкції та обґрунтування ефективних технічних рішень для підвищення енергоефективності будівель.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ ТЕПЛОІЗОЛЬОВАНУ СТІНУ

3.1. Моделі теплопередачі через багатошарові стіни

Теплопередача через багатошарові стінові конструкції є складним фізичним процесом, що визначає рівень енергоефективності будівель та їх експлуатаційні характеристики. Для кількісної оцінки теплових втрат і температурного режиму огорожувальних конструкцій у науковій та інженерній практиці застосовуються різні математичні моделі теплопередачі. Вони відрізняються ступенем деталізації, припущеннями та сферою застосування.

Найбільш поширеним підходом у проєктній та нормативній практиці є стаціонарна одновимірна модель теплопровідності, що ґрунтується на законі теплопровідності Фур'є. У межах цієї моделі вважається, що тепловий потік через стіну є сталим, а теплофізичні характеристики матеріалів не залежать від температури. Багатошарова стіна розглядається як послідовність шарів із відповідними термічними опорами, що дозволяє визначати сумарний опір теплопередачі конструкції. Простота реалізації є основною перевагою цього підходу, однак він не враховує вплив нестационарних умов експлуатації та теплової інерції матеріалів.

Для більш точного опису теплових процесів застосовуються нестационарні аналітичні моделі, які дозволяють враховувати змінність температурних режимів у часі та акумуляцію тепла в товщі конструкції. Такі моделі базуються на розв'язанні рівнянь нестационарної теплопровідності за відповідних початкових і граничних умов. Вони забезпечують більш адекватне відображення реальних умов експлуатації огорожувальних конструкцій, проте характеризуються підвищеною складністю математичного апарату та обмеженими можливостями отримання аналітичних розв'язків.

У практиці динамічного моделювання теплового стану будівель поширення набули моделі, побудовані за принципом теплових електричних аналогій. У таких моделях теплоізольована стіна подається у вигляді еквівалентного електричного

кола, де термічні опори відповідають окремим шарам конструкції, а теплоємності – їх здатності акумулювати теплову енергію. Застосування R–C моделей дозволяє ефективно аналізувати перехідні теплові процеси, однак при цьому просторовий розподіл температури описується у спрощеному вигляді.

Сучасні дослідження теплопередачі через багатошарові стіни все частіше базуються на використанні чисельних методів, зокрема методів скінченних різниць і скінченних елементів. Такі підходи дають змогу враховувати складну геометрію конструкцій, неоднорідність матеріалів, температурну залежність теплофізичних властивостей, а також наявність теплових містків. Основною перевагою чисельних моделей є висока точність результатів, тоді як до їх недоліків належать значні обчислювальні витрати та необхідність застосування спеціалізованого програмного забезпечення.

Для комплексної оцінки роботи огорожувальних конструкцій використовуються спряжені тепло- та вологообмінні моделі, які враховують взаємозв'язок процесів теплоперенесення і масоперенесення вологи в пористих матеріалах. Такі моделі є особливо актуальними при аналізі теплоізованих стін, оскільки зволоження матеріалів істотно впливає на їх теплотехнічні характеристики та довговічність. Водночас застосування цих моделей потребує значного обсягу вихідних даних і складних алгоритмів розрахунку.

Таким чином, вибір моделі теплопередачі через багатошарові стінові конструкції визначається метою дослідження, вимогами до точності результатів та наявними вихідними даними. Для нормативних і проєктних розрахунків доцільно використовувати спрощені стаціонарні моделі, тоді як для наукових досліджень та оптимізації конструктивних рішень перевагу слід надавати нестаціонарним і чисельним підходам. Існуючі моделі теплопередачі через багатошарові стіни відрізняються рівнем складності та точності. Для інженерних розрахунків зазвичай застосовують стаціонарні моделі, тоді як наукові дослідження та оптимізація конструкцій потребують нестаціонарних і чисельних підходів.

3.2. Чисельне моделювання розподілу температур і вологовмісту по товщині огорожувальних конструкцій в залежності від зовнішніх умов та типу теплоізоляційного матеріалу

Від температурно-вологісного стану огорожувальних конструкцій споруд залежать тепловтрати будинку у холодну пору року і теплонадходження в теплу. Це, в свою чергу, визначає навантаження на системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря і їх вартість, впливає на сталість температурного режиму в об'ємі приміщення з часом (при зміні температури, швидкості повітря зовні будинку, тепловіддачі системи опалення, температури на внутрішній поверхні огорожувальних конструкцій). Вибір оптимальних теплофізичних характеристик огорожувальних конструкцій дозволяє виключити утворення конденсату на внутрішній стороні, а також установити вологісний режим, що сприятливо впливає на теплозахисні властивості огороження.

До основних експлуатаційних характеристик цивільних і промислових будинків відносяться довговічність, надійність та економічність, які багато в чому обумовлені особливостями тепловологісного стану їх конструктивних елементів. Необхідність у визначенні тепловологісного стану виникає при проектуванні будівлі, у процесі його експлуатації, при модернізації та перебудові будинків. При цьому необхідно вирішити ряд задач, до яких відносяться визначення полів температури і вологовмісту стінових конструкцій, їх опір теплопередачі та масопереносу та ін.

Підвищення теплоізоляційної спроможності огорожувальних конструкцій будівель, що експлуатуються понад 30...40 років, може здійснюватися шляхом їх термомодернізації. Головним чином, термомодернізація полягає в заміні старих вікон на сучасні енергоефективні віконні конструкції, а також в нанесенні на зовнішню поверхню будівлі шару теплоізоляційного покриття. Головна мета термомодернізації полягає в зменшенні тепловтрат через поверхню огорож. Водночас додатковий теплоізоляційний шар за рахунок підвищення температури несучої стінової конструкції сприяє зменшенню її вологовмісту, що забезпечує подовження строку експлуатації будівлі.

Надлишкова волога, що проникає в капіляри пористих будівельних матеріалів, завдає їм руйнівної дії, знижуючи їх міцність. Надлишкове зволоження стінової конструкції призводить також до зниження її термічного опору. Подовження ресурсу будівельних конструкцій та зниження рівнів тепловтрат через огорожі досягається шляхом запобігання процесам їх зволоження. Водяна пара, концентрація якої всередині приміщення в зимовий період року вища, ніж концентрація вологи в зовнішньому повітряному просторі, переноситься шляхом дифузії з приміщення назовні через будівельну конструкцію. У випадку переохолодження будівельної конструкції водяна пара може досягти стану насичення, що призводить до випадіння конденсату на поверхні або всередині огорожувальних конструкцій споруд, а при різкому похолоданні можлива кристалізація вологи та перетворення її в лід.

Дослідження температурно-вологісного режиму будівельних конструкцій може виконуватися як шляхом експерименту, так і методами чисельного моделювання. Чисельне моделювання розподілу температур і вологовмісту по товщині огорожувальних конструкцій виконується на основі чисельного розв'язання системи рівнянь тепломасопереносу.

3.2.1. Чисельне моделювання температурного стану будівельних конструкцій

Розрахунковий метод визначення температурного стану будівельних конструкцій полягає у розв'язанні рівняння теплопереносу через огорожі будівель. Теплоперенос через стінову конструкцію описується рівнянням теплопровідності.

$$C_m \rho_m \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (3.1)$$

x, y, z - прямокутні координати; τ - час, с; ρ_m – густина будівельного матеріалу, кг/м³; C_m - теплоємність матеріалу, Дж/кг/К; λ_m - теплопровідність матеріалу, Вт/м/К.

Для розв'язання рівняння теплопровідності необхідно сформулювати для нього граничні умови на зовнішній та внутрішній поверхнях стіни. Механізм тепловіддачі на поверхнях стіни включає теплопровідність, природну або

вимушену конвекцію та випромінювання. Ці механізми узагальнюються граничними умовами третього роду, що мають вигляд:

- для внутрішньої поверхні стіни:

$$-\left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial n}\right)_n^+ = \alpha_{вн} (T_n - T_{вн}) \quad (3.2)$$

- для зовнішньої поверхні стіни:

$$-\left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial n}\right)_n^+ = \alpha_{зовн} (T_n - T_\infty); \quad (3.3)$$

де $\alpha_{вн}$ - радіаціо-конвекційний коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній поверхні стіни; $\alpha_{зовн}$ - радіаціо-конвекційний коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні стіни; λ_m - теплопровідність матеріалу стіни, n – напрямок зовнішньої нормалі до поверхні; T_n – температура поверхні (зовнішньої або внутрішньої); $T_{вн}$ – температура повітря всередині приміщення; T_∞ – температура зовнішнього повітря. Для наближених практичних розрахунків в літературі рекомендується застосовувати для зовнішнього та внутрішнього коефіцієнтів тепловіддачі наступні значення $\alpha_{вн}=8,6$ Вт/м²/К; $\alpha_{зовн}=23$ Вт/м²/К.

Для зменшення втрат теплоти через огорожувальні конструкції на зовнішній поверхні стіни наносяться теплоізоляційні покриття. Для розрахунку переносу теплоти через стінову конструкцію з теплоізоляційним покриттям необхідно скласти рівняння теплопровідності як для самої стіни, так і для покриття. На границі між стіною та покриттям необхідно задавати умови четвертого роду у вигляді:

$$-\left(\lambda_{покр} \frac{\partial T}{\partial n}\right)_s^+ = -\left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial n}\right)_s^-; \quad (3.4)$$

де $\lambda_{покр}$ - теплопровідність матеріалу покриття.

Система рівнянь теплопровідності з наведеними граничними умовами зазвичай розв'язується чисельним методом, наприклад методом скінчених різниць.

Рівняння теплопровідності (3.1) з граничними умовами (3.2)-(3.4) описує температурний стан стінової конструкції без врахування процесів вологоперенесення, які в певній мірі можуть на нього впливати. Для їх врахування необхідно розв'язувати задачу сумісного переносу теплоти та вологи через стінові конструкції.

3.2.2. Температурно-вологісний стан стінових конструкцій будівлі

Однією з важливих властивостей будівельних матеріалів є їх пористість та високий рівень поглинання вологи. Рідина, що проникає в капіляри, завдає руйнівної дії більшості будівельних матеріалів. Це призводить до зниження міцності будівельних матеріалів під впливом вологи та зниження однорідності структури матеріалів. При циклічному заморожуванні і відтаванні різко падає міцність пористих структур будівельних матеріалів. Від вмісту вологи залежить також термічний опір елементів будівлі, а значить і її енергоефективність. Основні шляхи проникнення вологи в будівельні конструкції - це випадання атмосферних опадів, рух ґрунтових і талих вод та конденсація водяної пари, що внаслідок дифузії переноситься через товщу конструкцій. Дифузія водяної пари відбувається внаслідок різниці парціальних тисків всередині будівлі та в зовнішньому середовищі.

Вірогідність випадіння конденсату всередині огорожувальних конструкцій будівель тим вища, чим більша різниця між температурами на її зовнішній та внутрішній поверхнях. Тому зовнішні поверхні несучих конструкцій споруд не повинні перебувати в зоні негативних температур. Підвищення температури зовнішньої поверхні стін зазвичай досягається шляхом нанесення шарів утеплювача з теплоізоляційних матеріалів на цих поверхнях.

Технічні рішення щодо раціонального вибору теплоізоляційного матеріалу повинні ґрунтуватися на точних і надійних методах розрахунку процесів тепловологопереносу через капілярно-пористі структури огорожувальних

конструкцій. До останнього часу прогнозування волого-температурних режимів огороджувальних конструкцій споруд виконувалося за досить спрощеними схемами на рівні застосування рівнянь для визначення зони конденсації за характером розподілу парціального тиску водяної пари і насиченої водяної пари у товщі шарів огороджувальної конструкції. Існуючі методи не враховують складність та сукупність процесів, які протікають в зовнішньому середовищі та всередині приміщення.

Серед механізмів переносу вологи в капілярно - пористих тілах, до яких відноситься більшість будівельних матеріалів, основними слід вважати дифузію водяної пари, що протікає за рахунок градієнта його парціального тиску в матеріалі, і перенос крапельної рідини за рахунок дії капілярних сил. За наявності усередині огороджувальної конструкції градієнта парціального тиску водяної пари буде відбуватися дифузний перенос пара з області з більш високим парціальним тиском пари в область, де цей тиск нижче. Якщо припустити, що загальний тиск пароповітряної суміші всередині стін постійний, рух цієї суміші через пори матеріалу будівельних конструкцій буде відсутній. Якщо відносна вологість повітря усередині матеріалу збільшується, дрібні пори матеріалу поступово заповнюються крапельною вологою. При високому вмісті крапельної вологи в матеріалі, коли його пори виявляються повністю заповненими рідиною, її перенос через пористий матеріал може здійснюватися за рахунок дії капілярних сил [18, 19].

Дифузія водяної пари в повітрі описується законом Фіка, згідно якого,

$$j_{va} = -\rho D_{va} \text{grad}(C_{va}),$$

де j_{va} - густина масового потоку водяної пари, кг/(м²с); C_{va} - відносна масова концентрація водяної пари в повітрі, кг/кг; D_{va} - коефіцієнт дифузії водяної пари в повітрі, м²/с; ρ – густина поро-повітряної суміші.

Дифузія водяної пари в повітрі, що знаходиться в порах капілярно-пористого тіла, описується скорегованим рівнянням Фіка

$$j_{va} = -\rho \frac{D_{va}}{\zeta} \text{grad}(C_{va}), \quad (3.5)$$

де ζ - коефіцієнт опору дифузії парів води в пористому матеріалі. Він відображає відношенням коефіцієнту дифузії парів води в пористому матеріалі до коефіцієнту дифузії парів води в повітрі. Значення коефіцієнту опору - більше одиниці, оскільки дифузія через пористий матеріал ускладнюється за рахунок дії різних факторів. Дифузія пари через пористий матеріал залежить від ступеня його насиченості вологою.

Закон Фіка записується також в іншому вигляді:

$$j_{va} = -\frac{D_{va}}{\zeta R_v T} \text{grad}(p_v) = -m \cdot \text{grad}(p_v),$$

що дозволяє розглядати градієнт парціального тиску пари p_v , як рушійну силу паропровідності будівельних конструкцій. Коефіцієнт m має назву коефіцієнт паропроникності. Якщо відомою є величина m , то $\frac{D_{va}}{\zeta} = m R_v T$.

Співвідношення між відносною концентрацією пари у повітрі C_{va} та парціальним тиском p_v можна записати у вигляді

$$C_{va} = \frac{\rho_v}{\rho_v + \rho_a} = \frac{p_v}{p_v + \frac{R_v}{R_a} p_a},$$

або

$$C_{va} = \frac{1}{1 + \left(\frac{p_0}{\phi p_{v,sat}(T)} - 1 \right) \frac{R_v}{R_a}}, \quad (3.6)$$

де ϕ – відносна вологість повітря в капілярно-пористому матеріалі; $p_{v,sat}$ - парціальний тиск насиченої пари при заданій температурі T . Таким чином, відносна концентрація водяної пари в повітрі є функцією відносної вологості повітря ϕ та температури T . За відомими C_{va} та T можна визначити ϕ за оберненою залежністю

$$\phi = \frac{p_0}{\left[\frac{R_a}{R_v} \left(\frac{1}{C_{va}} - 1 \right) + 1 \right] p_{v,sat}(T)}$$

Для розрахунку значення тиску насиченої водяної пари в [18] рекомендується залежність:

$$p_{v,sat}(T) = 611 \exp\left[\frac{17,08 \cdot (T - 273,15)}{T - 38,97}\right], \text{ Па}$$

Основною рушійною силою для рідкої вологи в капілярно-пористих тілах є градієнт капілярного тиску p_c . Потік рідкої вологи при цьому описується законом Дарсі:

$$j_l = K_l \text{grad}(p_c), \quad (3.7)$$

де K_l - коефіцієнт проникності для рідини в даному капілярно-пористому тілі. Як відомо, капілярний тиск складає різницю між тиском в газовому середовищі над меніском і тиском в рідині під меніском:

$$p_c = p_g - p_l,$$

Згідно з законом Кельвіна, над поверхнею рідини в капілярі відносна вологість не буде дорівнювати одиниці, а буде розраховуватися за формулою

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{v,sat}} = \exp\left(\frac{p_c}{\rho_l R_v T}\right),$$

або

$$p_c = \rho_l R_v T \ln(\varphi(C_{va}, T)). \quad (3.8)$$

Відносна вологість повітря над поверхнею меніска залежить від вмісту рідкої вологи в матеріалі w_l . Отже і капілярний тиск p_c також залежить від w_l . Ця залежність визначається з експерименту.

Виходячи з наведених вище співвідношень (3.5), (3.7), що характеризують механізми переносу вологи через капілярно-пористі будівельні матеріали, складаються рівняння переносу рідкої та газоподібної вологи в капілярно - пористому матеріалі.

Для рідкої складової рівняння масопереносу має вигляд

$$\frac{\partial w_l}{\partial \tau} = \nabla(K_l \nabla p_c) + H_l, \quad (3.9)$$

де w_l - вологовміст рідкої вологи, кг/м³.

Для рівняння збереження та переносу водяної пари матимемо:

$$\frac{\partial \rho C_{va}}{\partial \tau} = \nabla \left(\rho \frac{D_{va}}{\zeta} \nabla C_{va} \right) + H_v, \quad (3.10)$$

Джерельні члени H_v , H_l , що стоять у відповідних рівняннях збереження маси пару та рідини, характеризують наявність фазових переходів, в результаті яких маса однієї з фаз може збільшуватися, або зменшуватися за рахунок збільшення, або зменшення іншої фази. Відповідним чином, $H_v = -H_l$; якщо відбувається випаровування або конденсація.

При складанні рівнянь (3.9), (3.10) можна одержати рівняння сумарного переносу рідкої та пароподібної вологи в капілярно-пористому тілі:

$$\frac{\partial (w_l + \rho C_{va})}{\partial \tau} = \nabla \left(\rho \frac{D_{va}}{\zeta} \nabla C_{va} + K_l \nabla p_c \right).$$

Згідно рівняння (3.6) відносна концентрація водяної пари в капілярно-пористому тілі C_{va} залежить від відносної вологості повітря в капілярно-пористому матеріалі ϕ та температури T . Величина ϕ в свою чергу залежить від воготовмісу матеріалу w_l . Капілярний тиск p_c також залежить від w_l та температури T . Вводячи позначення

$$w = w_l + \rho C_{va}$$

перепишемо останнє рівняння у вигляді:

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = \nabla \left[\left(\rho \frac{D_{va}}{\zeta} \frac{\partial C_{va}}{\partial w_l} + K_l \frac{\partial p_c}{\partial w_l} \right) \nabla w + \left(\rho \frac{D_{va}}{\zeta} \frac{\partial C_{va}}{\partial T} + K_l \frac{\partial p_c}{\partial T} \right) \nabla T \right] \quad (3.11)$$

За формою дане рівняння подібне до рівняння масопереносу А.В.Ликова [27]. В ньому рушійними силами перенесення вологи вважаються градієнт воготовмісу матеріалу w та градієнт температури T . Еквівалентну до нього форму можна одержати, якщо рушійними силами перенесення вологи вважати градієнт відносної концентрації пари в повітря \tilde{N}_{va} , що знаходиться в порах, та градієнт температури T .

$$\frac{\partial w}{\partial C_{va}} \frac{\partial C_{va}}{\partial \tau} + \frac{\partial w}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla \left[\left(\rho \frac{D_{va}}{\zeta} + K_l \frac{\partial p_c}{\partial C_{va}} \right) \nabla C_{va} + K_l \frac{\partial p_c}{\partial T} \nabla T \right] \quad (3.12)$$

В залежності від умови задачі доцільно використовувати ту чи іншу форму рівняння масоперенесення.

Рівняння теплопереносу у випадку наявності масопереносу матиме вигляд.

$$\begin{aligned} (\rho_m c_m + w_l c_l + w_v c_v + w_a c_a) \frac{\partial T}{\partial \tau} = & \left[c_l K_l \nabla p_c + \left(\rho \frac{D_{va}}{\zeta} \nabla C_{va} \right) (c_v - c_a) \right] \cdot \nabla T + \\ & + \nabla \left(\left(\lambda_m + \frac{w_l}{\rho_l} \lambda_l + \frac{w_v}{\rho_v} \lambda_0 \right) \nabla T \right) + r H_l \end{aligned} \quad (3.13)$$

ρ_m ; ρ_l ; ρ_v ; ρ_a , кг/м³ - густини твердого компонента, рідини, пари та сухого повітря відповідно; $\rho_g = \rho_v + \rho_a$ - густина пароповітряної суміші; c_m ; c_l ; c_v ; c_a , Дж/(кг К) - теплоємкості твердого компонента, рідини, пари та сухого повітря відповідно; λ_m ; λ_l ; λ_g , Дж/(мК) - теплопровідності твердого компонента, рідини та пароповітряної суміші відповідно; r , Дж/кг - питома теплота пароутворення (конденсації).

Перший доданок у правій частині цього рівняння враховує конвекційний перенос теплоти масою рідини, що рухається завдяки наявності капілярних сил, та конвекційний теплоперенос внаслідок взаємної дифузії водяної пари та повітря. Останній член характеризує теплоту фазового переходу.

Граничні умови для даної системи рівнянь на зовнішній та внутрішній поверхнях огорожувальної конструкції мають вигляд

для рівняння масопереносу:

$$K_l \left(\frac{\partial p_c}{\partial n} \right)_{\Pi}^+ - \rho \frac{D_{va}}{\zeta} \left(\frac{\partial C_{va}}{\partial n} \right)_{\Pi}^+ = \beta_c (C_{v,\Pi} - C_{v,\infty}); \quad (3.14)$$

для рівняння теплопереносу:

$$- \left((1 - \Pi) \lambda_m + \frac{w_l}{\rho_l} \lambda_l + \frac{w_v}{\rho_v} \lambda_g \right) \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_n^- = \alpha_{c+r} (T_s - T_\infty) + r \beta (C_{v,s} - C_{v,\infty}); \quad (3.15)$$

де α_{c+r} - радіаційно - конвекційний коефіцієнт тепловіддачі на поверхнях; β_c - конвекційний коефіцієнт масовіддачі на поверхнях; Π - пористість матеріалу будівельної конструкції. Індекс « n » відповідає значенням величин на поверхнях; ∞ - відповідає значенням величин на значній віддалі від поверхонь.

Коефіцієнт масовіддачі β можна розраховувати за аналогією між теплопереносом та масопереносом в повітряному середовищі. Співвідношення між α та β у такому випадку має вигляд:

$$\beta = \frac{\alpha}{C_a Le^{2/3}},$$

де $Le = \frac{D_{va} C_a \rho_a}{\lambda_a}$ - число Л'юїса.

Аналізуючи процеси тепломасопереносу через капілярно-пористі структури стінових конструкцій треба зазначити, що перенос рідкої фази зазвичай відбувається не надто інтенсивно. Перенос пароподібної вологи протікає суттєво інтенсивніше. Не надто інтенсивно протікає також процес випаровування або конденсації всередині стінової конструкції. Виходячи з цього, для практичної реалізації моделі тепломасопереносу через стінові конструкції наведену вище модель доцільно спростити. У спрощеній моделі масопереносу залишається лише рівняння переносу пароподібної вологи, що не враховує наявність процесу випаровування (конденсації) всередині матеріалу

$$\frac{\partial \rho C_{va}}{\partial \tau} = \nabla \left(\rho \frac{D_{va}}{\zeta} \nabla C_{va} \right) \quad (3.16)$$

В рівнянні теплопереносу не враховується теплота фазового переходу та конвекційний теплоперенос, що відбувається внаслідок взаємної дифузії пари і повітря, а також внаслідок переносу пароподібної вологи. Рівняння теплопереносу приймає вигляд:

$$(c\rho)_{ef} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla (\lambda_{ef} \nabla T), \quad (3.17)$$

де $(c\rho)_{ef} = \rho_m \tilde{n}_m + w_l \tilde{n}_l + w_v \tilde{n}_v + w_a \tilde{n}_a$; $\lambda_{ef} = \lambda_m + \frac{w_l}{\rho_l} \lambda_l + \frac{w_v}{\rho_v} \lambda_0$.

Спрощуються також граничні умови

- для рівняння масопереносу

$$-\rho \frac{D_{va}}{\zeta} \left(\frac{\partial C_{va}}{\partial n} \right)_i^- = \frac{\beta_c}{1 - C_{va}} (C_{v,i} - C_{v,\infty}); \quad (3.18)$$

- для рівняння теплопереносу

$$-\lambda_{ef} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_n = \alpha_{c+r} (T_n - T_\infty) \quad (3.19)$$

Замість рівняння переносу рідкої фази для визначення її вмісту застосовується крива сорбції – десорбції, яка відображає залежність рівноважного вологовмісту від відносної вологості повітря. Зазвичай залежність вологовмісту капілярно-пористого матеріалу від відносної вологості повітря описується апроксимуючою емпіричною функцією. Розглянемо найбільш вживані для розрахунку вологовмісту будівельних матеріалів.

При аналізі експериментальних даних по визначенню рівноважної вологості будівельних матеріалів було встановлено, що в інтервалі відносної вологості повітря φ від 0,4 до 0,9 рівняння ізотерми адсорбції можна прийняти у вигляді:

$$W_p^c = a \cdot \left(\frac{\varphi}{(1-\varphi)} \right)^b, \quad (3.20)$$

де: W_p^c – відносна рівноважна вологість матеріалу, яка з вологовмістом w_l зв'язана співвідношенням $W_p^c = \frac{w_l}{\rho_m(1-\Pi)}$, a , b – коефіцієнти рівняння, які апроксимують

залежать W_p^c від температури і визначаються за експериментальними даними.

Крім виразу (3.20), для математичного опису кривих сорбції застосовують також співвідношення

$$W_p^c = \frac{1}{c \cdot \ln(\varphi) + d}$$

де c , d – коефіцієнти апроксимуючого рівняння.

3.2.3. Скінчено-різницевий метод розв'язання рівнянь тепломасопереносу

Скінчено-різницевий метод розв'язання рівнянь тепломасопереносу, які є диференціальними рівняннями в частинних похідних, полягає в наближеній апроксимації частинних похідних алгебраїчними виразами – скінченими

різницями. Розглянемо застосування методу скінчених різниць для випадку тривимірного рівняння теплопровідності (3.1).

Спочатку в розрахунковій області будується різницева сітка. Ця сітка характеризується довжинами дискретних кроків по просторових змінних Δx , Δy , Δz та дискретним кроком за часом $\Delta \tau$.

Частинна похідна за часом апроксимується скінчено-різницеvim виразом:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau}(\tau = \tau_k) \approx \frac{T(\tau_k + \Delta \tau, z_l, y_i, x_j) - T(\tau_k, z_l, y_i, x_j)}{\Delta \tau} = \frac{T_{l,i,j}^{k+1} - T_{l,i,j}^k}{\Delta \tau}, O(\Delta \tau)$$

де k – номер поточного кроку за часом; $k+1$ – номер наступного кроку за часом; $0 < l < L$; $0 < i < M$; та $0 < j < N$ – номери кроків по просторових змінних; L, M та N – кількості кроків за просторовими змінними; $O(\Delta \tau)$ – точність, або порядок апроксимації. Для першої похідної за часом, це – перший порядок точності апроксимації, який відповідає порядку величини кроку за часом $\Delta \tau$. Порядок, або точність апроксимації, характеризує відмінність величини похідної, записаних в скінчених різницях, від дійсного значення похідної $\frac{\partial T}{\partial \tau}$

Просторова частинна похідна за змінною y апроксимується виразом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} &\approx \frac{1}{\Delta y} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_{i+1/2} - \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_{i-1/2} \right] = \frac{1}{\Delta y} \left[\frac{T_{l,i+1,j}^k - T_{l,i,j}^k}{\Delta y} - \frac{T_{l,i,j}^k - T_{l,i-1,j}^k}{\Delta y} \right] = \\ &= \frac{T_{l,i+1,j}^k - 2 \cdot T_{l,i,j}^k + T_{l,i-1,j}^k}{\Delta y^2}, O(\Delta y^2) \end{aligned}$$

або

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \approx \frac{T_{l,i+1,j}^{k+1} - 2 \cdot T_{l,i,j}^{k+1} + T_{l,i-1,j}^{k+1}}{\Delta y^2}, O(\Delta y^2)$$

Перший вираз відповідає явній за часом схемі апроксимації просторової похідної, а другий вираз – неявній схемі. Їх відмінність полягає в тому, що до першого виразу входять дискретні значення температури $T_{l,i,j}^k$, які вже розраховані на попередньому часовому кроці і є відомими величинами. До другого виразу входять дискретні значення температури $T_{l,i,j}^{k+1}$, які будуть розраховуватися на

наступному часовому кроці i є невідомими величинами. Обидва вирази мають другий порядок точності апроксимації по просторовій змінній. Цей порядок відповідає значенню квадрату кроку Δy^2 за просторовою змінною y .

Аналогічно записуються частинні похідні за іншими просторовими змінними.

З використанням наведених виразів складається скінчено різницевий аналог рівняння теплопровідності. У випадку застосування явної схеми апроксимації скінчено різницевого рівняння матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{C_p \rho}{\lambda} \frac{T_{l,i,j}^{k+1} - T_{l,i,j}^k}{\Delta \tau} = & \frac{T_{l+1,i,j}^k - 2 \cdot T_{l,i,j}^k + T_{l-1,i,j}^k}{\Delta y^2} + \frac{T_{l,i+1,j}^k - 2 \cdot T_{l,i,j}^k + T_{l,i-1,j}^k}{\Delta y^2} + \\ & + \frac{T_{l,i,j+1}^k - 2 \cdot T_{l,i,j}^k + T_{l,i,j-1}^k}{\Delta x^2} \end{aligned}$$

Наведені різницеві схеми відповідають випадку лінійного рівняння теплопровідності, коли коефіцієнт теплопровідності є постійною величиною. Якщо коефіцієнт теплопровідності – величина, що залежить від температури, скінчено різницева схема має більш складний вигляд. Для випадку явної схеми маємо:

$$\begin{aligned} C_p \rho \frac{T_{l,i,j}^{k+1} - T_{l,i,j}^k}{\Delta \tau} = & \\ = \frac{1}{\Delta z} \left(\frac{\lambda_{l+1,i,j}^k + \lambda_{l,i,j}^k}{2} \cdot \frac{T_{l+1,i,j}^k - T_{l,i,j}^k}{\Delta z} - \frac{\lambda_{l,i,j}^k + \lambda_{l-1,i,j}^k}{2} \cdot \frac{T_{l,i,j}^k - T_{l-1,i,j}^k}{\Delta z} \right) + & \\ + \frac{1}{\Delta y} \left(\frac{\lambda_{l,i+1,j}^k + \lambda_{l,i,j}^k}{2} \cdot \frac{T_{l,i+1,j}^k - T_{l,i,j}^k}{\Delta y} - \frac{\lambda_{l,i,j}^k + \lambda_{l,i-1,j}^k}{2} \cdot \frac{T_{l,i,j}^k - T_{l,i-1,j}^k}{\Delta y} \right) + & \quad (3.21) \\ + \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{\lambda_{l,i,j+1}^k + \lambda_{l,i,j}^k}{2} \cdot \frac{T_{l,i,j+1}^k - T_{l,i,j}^k}{\Delta x} - \frac{\lambda_{l,i,j}^k + \lambda_{l,i,j-1}^k}{2} \cdot \frac{T_{l,i,j}^k - T_{l,i,j-1}^k}{\Delta x} \right) & \end{aligned}$$

При $l=0$; $l=L$, $i=0$; $i=M$ та при $j=0$; $j=N$ вважаються заданими граничні умови до рівняння.

У випадку лінійного рівняння теплопровідності розв'язання скінчено різницевого рівняння, складеного за явною схемою, має простий вигляд

$$T_{l,i,j}^{k+1} = T_{l,i,j}^k + a\Delta\tau \left(\frac{T_{l+1,i,j}^k - 2 \cdot T_{l,i,j}^k + T_{l-1,i,j}^k}{\Delta z^2} + \frac{T_{l,i+1,j}^k - 2 \cdot T_{l,i,j}^k + T_{l,i-1,j}^k}{\Delta y^2} + \frac{T_{l,i,j+1}^k - 2 \cdot T_{l,i,j}^k + T_{l,i,j-1}^k}{\Delta x^2} \right) \quad (3.22)$$

де $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ - коефіцієнт температуропровідності.

Крім точності апроксимації важливими характеристиками різницевих схем є їх збіжність та стійкість. Схема вважається збіжною, коли зі зменшенням кроків за часом $\Delta\tau$ та по просторовим змінним $\Delta z, \Delta y$ та Δx результат чисельного розв'язання диференціального рівняння все більше наближається до результату точного аналітичного розв'язання диференціального рівняння. Таким чином, точність розв'язання задачі методом скінчених різниць збільшується зі зменшення кроків різницевої сітки.

Схема називається стійкою, якщо малі збурення початкових або граничних умов призводять до малих збурень різницевого розв'язання задачі. Якщо малі збурення початкових або граничних умов призводять до збурень більш високого порядку у результатах розв'язання скінчено різницевої задачі, то такі різницеві схеми вважаються нестійкими.

Для явної схеми апроксимації умова стійкості забезпечується співвідношенням між кроком за часом та довжинами кроків по просторовим змінним. Ця умова записується у вигляді:

$$\Delta\tau < \frac{0,5}{a \left(\frac{1}{\Delta z^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta x^2} \right)} \quad (3.23)$$

3.2.4. Аналіз результатів чисельного моделювання температурно-вологісного стану стінових конструкцій будівлі, одержаних за одновимірною стаціонарною моделлю тепломасоперенесення

За наведеною моделлю проведено чисельне моделювання температурно-вологісного режиму одно - та багат шарових будівельних конструкцій. Для розв'язання рівнянь тепломасоперенесення застосовується метод скінчених різниць. Розглядається одновимірний стаціонарний режим тепломасопереносу. За результатами розрахунків визначаються функції розподілу відносного паровмісту $C_{va}(x_i)$ та температури $T(x_i)$ по товщині стіни та теплоізоляції. За функцією розподілу паровмісту $C_{va}(x_i)$ розраховується також розподіл парціального тиску водяної пари по товщині стіни та теплоізоляції. Для цього використовується залежність

$$p_v(x_i) = \frac{p_0}{\left[\frac{R_a}{R_v} \left(\frac{1}{C_{va}(x_i)} - 1 \right) + 1 \right]}$$

За результатами розрахунків визначено вплив характеристик теплопереносу та вологопереносу матеріалів несучої конструкції та теплоізоляційних матеріалів, а також вплив умов тепло - та масовіддачі на поверхнях будівельних конструкцій на їх температурний та вологісний режими, а також на рівень тепловтрат через огорожувальні конструкції будівель при їх термомодернізації. Вплив характеристик тепло- та масопереносу на температурно-вологісний режим огорожувальної конструкції з шаром утеплювачем та без утеплювача видно з рис. 3.1...3.3.

На рис.3.1 а відображено розподіл температури по товщині цегляної стіни ($\lambda_{ц}=0,58$ Вт/(м К)) без утеплювача та з двома варіантами утеплювача: пінополістирол та мінеральна вата. Товщина несучої стіни 0,2 м, а товщина утеплювача 0,1 м. Координата x відраховується від внутрішньої поверхні стіни в напрямку зовнішнього простору. Розрахункові дані одержані за наступних умов: температура повітря всередині приміщення $t_{вн}=20$ °С; відносна вологість повітря всередині приміщення $\phi_{вн}=0,7$; температура зовнішнього повітря $t_3= -15$ °С; відносна вологість зовнішнього повітря $\phi_3=0,9$. Розраховані за формулою (3.6) значення відносної концентрації водяного пару всередині приміщення та у зовнішньому повітряному просторі складають відповідно $C_{va,вн}=0,01$ та $C_{va,3}=0,001$.

За цих умов водяна пара шляхом дифузії переноситься через цегляну стіну з приміщення назовні.

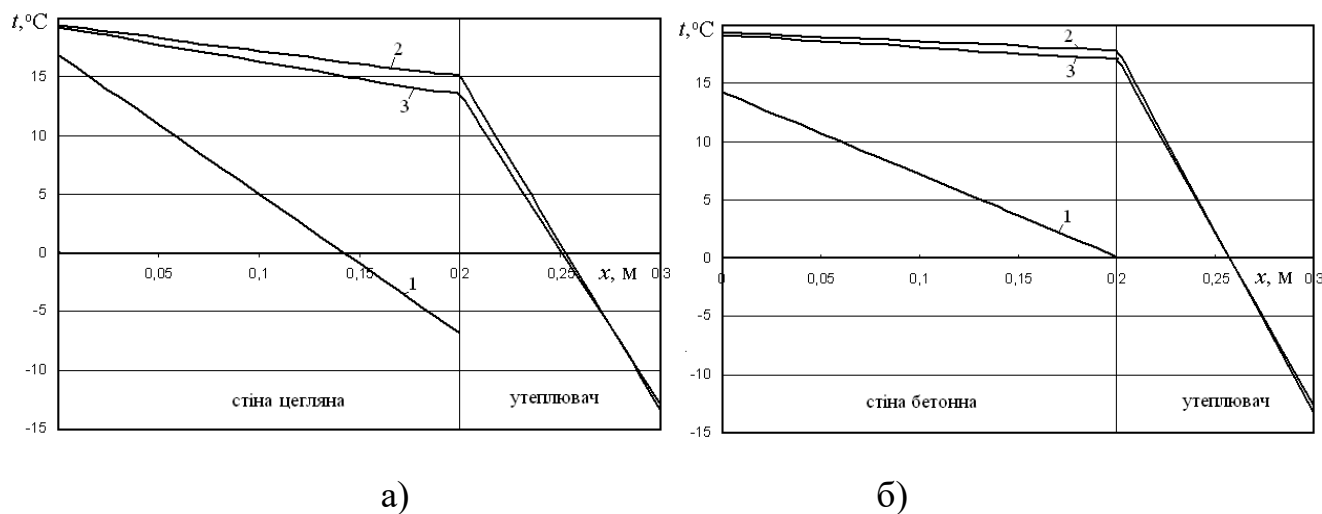


Рис. 3.1. Розподіл температури по товщині цегляної (а) та бетонної (б) стіни: 1 - без утеплювача; 2 - утеплювач - пінополістирол; 3 - утеплювач – мінеральна вата.

Як видно з рис. 3.1 (крива 1), у випадку цегляної стіни без утеплювача температура її внутрішньої поверхні ($x=0$) складає 17°C , а зовнішньої ($x=0,2$ м): $-6,9^{\circ}\text{C}$. Застосування на зовнішній поверхні цегляної огорожі як одного, так і другого утеплювача суттєво підвищує температурний рівень несучої цегляної стіни. Зменшуються також градієнти температури по товщині несучої стіни. Найвищі градієнти температури спостерігаються в шарі теплоізоляції. Оскільки коефіцієнт теплопровідності пінополістиролу менший за коефіцієнт теплопровідності мінеральної вати, температурний рівень цегляної стінки у випадку застосування утеплювача з пінополістиролу виявляється дещо вищим (крива 2), ніж у випадку застосування мінеральної вати (крива 3).

Аналогічні результати, одержані для випадку несучої стіни, виконаної з бетону ($\lambda_6=1,82$ Вт/(м К)), наведено на рис. 3.1 б. Як видно з цього рисунку, температура внутрішньої поверхні стіни без утеплювача виявляється у цьому випадку нижчою, ніж температура внутрішньої поверхні цегляної стіни, а температура зовнішньої поверхні – вищою, ніж у стіни з цегли. Це пояснюється

більш високим значенням коефіцієнту теплопровідності бетону в порівнянні з коефіцієнтом теплопровідності цегли.

Що ж стосується вологовмісту, то його розподіл по товщині стіни залежить як від розподілу температури, так і від співвідношення між коефіцієнтами паропроникності матеріалу несучої стіни і матеріалу утеплювача. Коефіцієнт паропроникності матеріалу m зв'язаний з коефіцієнтом опору дифузії парів води в пористому матеріалі ζ співвідношенням $m = \frac{D_{va}}{\zeta R_v T}$

На рис. 3.2 а відображено розрахований за наведених вище умов розподіл парціального тиску по товщині цегляної стіни без утеплювача (крива 1). Розподіл тиску насиченої пари, який визначається за температурою в кожній точці стіни, представлено кривою 2. Коефіцієнт паропроникності для цегли складає $m_{ц}=0,15$ мг/(м год Па). Як видно з рис. 3.2 а, на ділянці $0,06 \text{ м} < x < 0,14 \text{ м}$ парціальний тиск водяної пари досягає значень, характерних для насиченої водяної пари $p_{v,н}$. Це означає, що за наведених умов по розподілу температури та вологості повітря в цегляній стіні, на зазначеній її ділянці стіни відбувається випадіння конденсату водяної пари і перенасичення рідкою вологою матеріалу стіни.

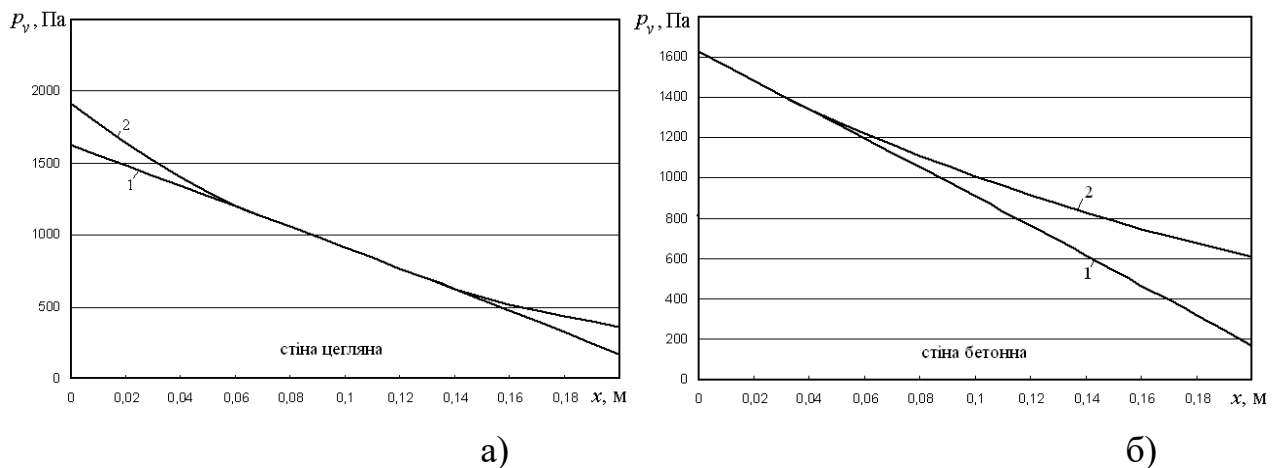


Рис. 3.2. Розподіл тиску водяної пари по товщині цегляної стіни (а) та бетонної стіни (б) без утеплювача: 1 – $p_v(x)$; 2 – $p_{v,н}(T(x))$

Результати щодо розподілу парціального тиску пари в бетонній стіні наведено на рис. 3.2 б. Коефіцієнт паропроникності для бетону суттєво менший, ніж у цегли

і складає $m_6=0,03$ мг/(м год Па). Як видно з рисунку, в даному випадку водяна пара стає насиченою вже біля внутрішньої поверхні бетонної стіни, що є наслідком переохолодження цієї поверхні. Випадіння конденсату за цих умов відбувається як на поверхні стіни, що контактує з внутрішнім повітряним середовищем приміщення, так і в її об'ємі на ділянці $x < 0,14$ м.

Розподіл парціального тиску водяної пари по товщині цегляної стіни з шаром мінеральної вати на зовнішній поверхні наведено на рис. 3.3 а (крива 1). Внаслідок того, температура цегляної стіни з утеплювачем значно вища, ніж температура стіни без утеплювача, умови для інтенсивної конденсації водяної пари в стіні не виникають. Про це свідчить крива 2 на рис. 3.3 а, що відображає розподіл парціального тиску насиченої водяної пари. Важливим також є те, що коефіцієнт паропроникності мінеральної вати складає $m=0,4$ мг/(м год Па). Він значно перевищує коефіцієнт паропроникності цегли. Завдяки цьому, зовнішній шар мінеральної вати вільно пропускає назовні водяну пару, що надходить з приміщення через цегляну стіну. Треба також зазначити, що внаслідок високого коефіцієнту паропроникності мінеральної вати, конденсація вологи як в об'ємі утеплювача, так і на його поверхнях також не відбувається, хоча температура утеплювача інтенсивно знижується в напрямку з середини – назовні (рис. 3.1 а, крива 3).

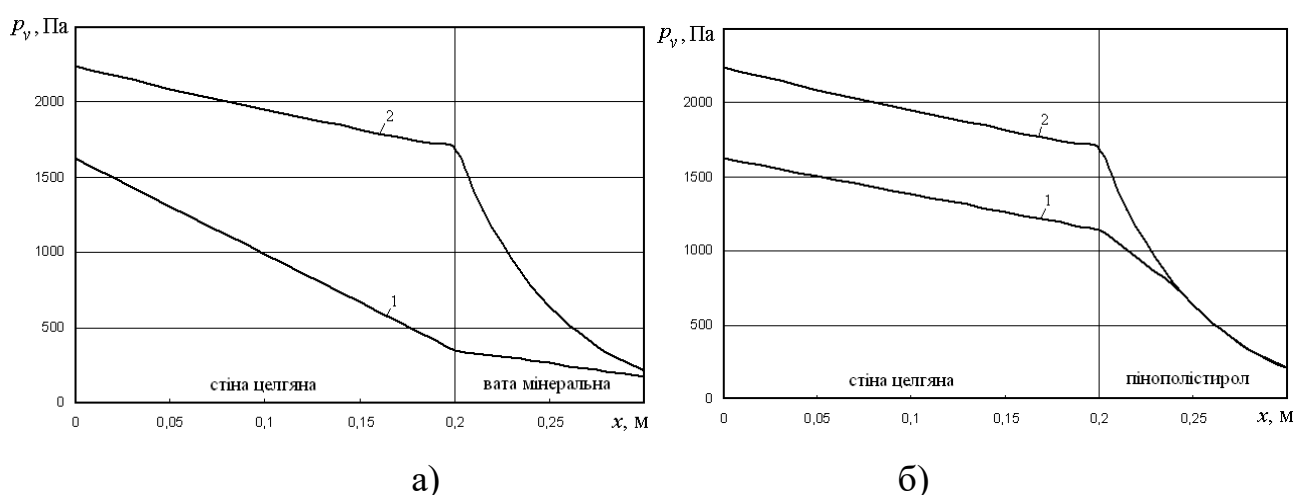


Рис. 3.3 Розподіл тиску водяної пари по товщині цегляної стінки з шаром мінеральної вати (а) та з шаром пінополістиролу (б) на зовнішній поверхні: 1 – $p_v(x)$; 2 – $p_{v,н}(T(x))$

Інший вигляд має розподіл парціального тиску водяної пари по товщині цегляної стіни та утеплювача у випадку, коли утеплювачем є пінополістирол (рис. 3.3 б). Коефіцієнт паропроникності пінополістиролу значно нижчий, ніж у цегли та у мінеральної вати і складає $m=0,04$ мг/(м год Па). Внаслідок цього шар утеплювача перешкоджає дифузійному потоку водяної пари, що переноситься через цегляну стіну з приміщення у зовнішній простір. Це, в порівнянні з випадком утеплювача з мінеральної вати, підвищує парціальний тиск водяної пари всередині несучої цегляної стіни, а також сприяє інтенсивній конденсації вологи та її накопиченню в шарі утеплювача. Як видно з рис. 3.3 б, на ділянці шару пінополістиролу $0,25 \text{ м} < x < 0,3 \text{ м}$ криві розподілу парціального тиску водяної пари всередині утеплювача та крива розподілу парціального тиску для насиченої пари збігаються, що свідчить про утворення конденсату на цій ділянці.

З розглянутих результатів випливає, що для виключення можливості конденсації пари на поверхні та всередині несучої стіни, або теплоізоляційного шару, паропроникність матеріалів, що використовуються для утеплення, повинна підвищуватися в напрямку зсередини – назовні.

3.3. Результати розрахунків полів температури та концентрацій вологи в стіновій конструкції

Як вже було визначено з розв'язання одновимірної задачі, шар зовнішньої теплоізоляції сприяє зменшенню градієнтів температури та вологовмісту всередині зовнішніх огорож. Далі розглядається вплив теплоізоляційного покриття на розподіл температури та вологовмісту по об'єму стінової конструкції. Для цього задача тепловологоперенесення розв'язується в тривимірній постановці. Як приклад, розглядається ділянка зовнішньої стіни приміщення з одним вікном та одним нагрівальним пристроєм (панельним радіатором). Елемент стінової конструкції (бетонна панель) має висоту $H=3$ м та ширину $B=3$ м. Товщина стіни $\delta_{\text{ст}}=0,25$ м. В панелі міститься віконний проріз висотою 1,5 м та шириною 1,8 м. Радіатор розташований під вікном з правої сторони від його середини.

Для визначення полів температури та вологовмісту бетонної панелі розв'язується система тривимірних рівнянь (3.16) та (3.17) для умов стаціонарного тепломасопереносу, з граничними умовами (3.18), (3.19) на її відкритих поверхнях. У зв'язку з наявністю променевого теплового потоку, що надходить від радіатора на ділянку внутрішньої поверхні стінової конструкції, гранична умова (3.19) для цієї ділянки доповнюється складовою, що враховує цей променевий тепловий потік. На торцевих поверхнях бетонної панелі, а також на поверхнях віконного прорізу, приймаються умови теплоізоляції.

Результати розрахунку температурного поля та поля відносної вологості матеріалу W в бетонній панелі для випадку $t_3 = -8$ °C; $\varphi_3 = 0,85$; $t_B = 18$ °C; $\varphi_B = 0,55$; $t_p = 50$ °C наведені на рис. 3.4, 3.5. Для розрахунків приймалися значення $\alpha_B = 8,6$ Вт/(м²К); $\alpha_3 = 23$ Вт/(м²К); $\beta = \alpha/C_a$. Відносна концентрація водяної пари в зовнішньому та внутрішньому повітряному середовищі складає за цих умов $C_{va,3} = 0,00172$ та $C_{va,B} = 0,00694$. Відносна вологість матеріалу W визначається з кривої сорбції-десорбції для матеріалу стіни (бетону) після визначення розподілу відносної концентрації водяної пари в порах стіни. Цей розподіл визначається з розв'язання рівняння масоперенесення для водяної пари (3.17).

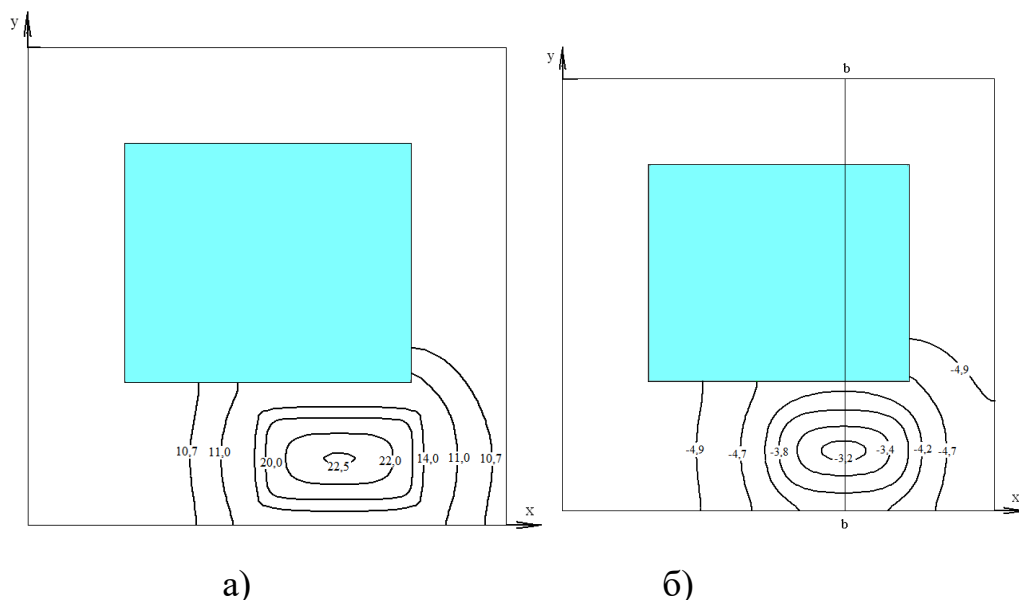


Рис. 3.4 Розподіл температури (°C) по внутрішній (а) та по зовнішній (б) поверхнях стіни без утеплювача

На рис. 3.4а представлено розподіл температури по внутрішній поверхні стіни ($z=0$), а на рис. 3.4б - по зовнішній поверхні стіни ($z= \delta_{ст} =0,25$ м). Як видно з рисунків, найвища температура внутрішньої поверхні стіни спостерігається в області, біля якої розташовується радіатор. Максимальна температура в цій області становить $+22,5$ °С. За межами цієї зарядіаторної ділянки температура різко спадає і становить $\sim +10,7$ °С. На зовнішній поверхні стіни максимальна температура в області зарядіаторної ділянки складає $\sim -3,2$ °С, а на іншій частині зовнішньої поверхні $\sim -4,9$ °С.

Розподіл відносного вологовмісту по внутрішній поверхні стіни ($z=0$) представлено на рис. 3.5а, а по зовнішній поверхні стіни ($z= \delta_{ст} =0,25$ м) - на рис. 3.5б. Як видно з рисунків, на внутрішній поверхні стіни найменша відносна вологість матеріалу $W= 0,83\%$ спостерігається в області, біля якої розташовується радіатор, де спостерігається максимальна температура стіни. Така ситуація має місце навіть за умов, що концентрація водяної пари в повітрі біля цієї поверхні - максимальна і складає $C_{va,в} = 0,00694$. З відстанню від зарядіаторної ділянки відносна вологість матеріалу збільшується. Її максимальне значення становить $W =1,53\%$. На зовнішній поверхні стіни відносна вологість матеріалу розподіляється більш рівномірно, ніж на внутрішній. В області зарядіаторної ділянки вона мінімальна і складає $W \sim 1,15\%$, а на іншій частині зовнішньої поверхні $W \sim 1,264\%$.

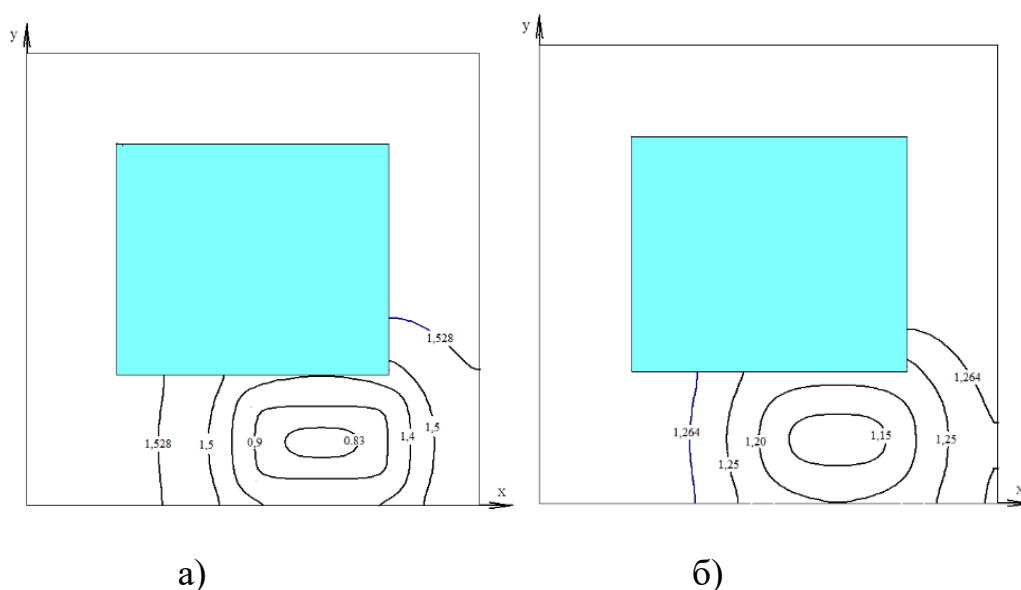


Рис. 3.5 Розподіл відносної вологості матеріалу (%) по внутрішній (а) та по зовнішній (б) поверхнях стіни без утеплювача

Інша картина розподілу температури та відносної вологості матеріалу буде спостерігатися при наявності утеплювача на зовнішній поверхні огорожувальної конструкції будинку. Розглянемо випадок наявності на зовнішній поверхні бетонної стіни теплоізоляційного шару з мінеральної вати. Товщина шару складає $\delta_i=10$ см. Зовнішні та внутрішні температурні умови такі ж самі, як у випадку, що розглядався вище.

Розподіли температури по зовнішній і внутрішній поверхнях бетонної стіни для випадку наявності теплоізоляційного шару на її зовнішній поверхні відображено на рис. 3.6.

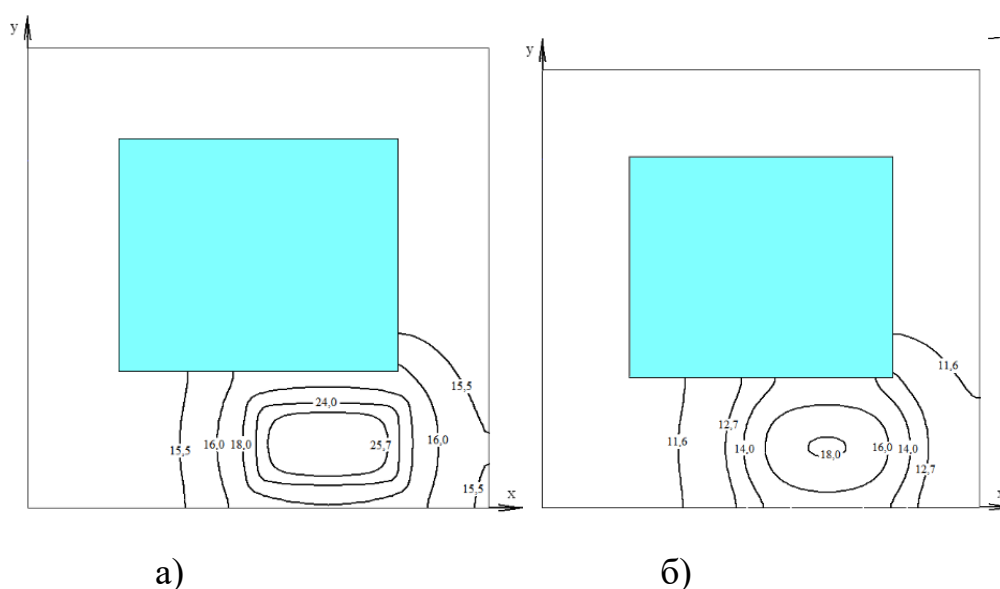


Рис. 3.6 Розподіл температури (°C) по внутрішній (а) та по зовнішній (б) поверхнях стіни за умов наявності теплоізоляційного шару

Як видно з рисунку, найвища температура внутрішньої поверхні стіни спостерігається в області зарядаторної ділянки (рис. 3.6 а). Максимальна температура в цій області за умов наявності утеплювача на зовнішній поверхні становить 25,7°C. За межами цієї ділянки температура знижується до +15,5 °C. На зовнішній поверхні стіни (перед утеплювачем) максимальна температура в області зарядаторної ділянки лишається порівняно високою +18 °C, а на іншій частині зовнішньої поверхні вона складає +11,6 °C (рис. 3.6 б). Найбільш суттєво температура спадає в області утеплювача..

Умови, в яких знаходиться сама бетонна стіна при наявності на її зовнішній поверхні утеплювача, характеризуються більш високими значеннями температури і більш рівномірним її розподілом по об'єму стінової конструкції в порівнянні з випадком, коли утеплювач відсутній. Суттєво зменшуються при цьому густини теплових потоків, що надходять до внутрішньої поверхні стіни від внутрішнього повітря та від радіатора. Розподіл густини теплового потоку по внутрішній та зовнішній поверхнях стіни вздовж лінії *a-a* (рис. 3.4 б) за умов відсутності теплоізоляції та за умов її наявності, наведено на рис. 3.7.

Розподіли відносної вологості матеріалу по зовнішній і внутрішній поверхнях бетонної стіни для випадку наявності теплоізоляційного шару на її зовнішній поверхні відображено на рис. 3.8. Як видно з рис. 3.6, при наявності теплоізоляційного шару на зовнішній поверхні стіни її температура підвищується і стає на більшості її ділянок вищою за $t_0=11^\circ\text{C}$. Водночас вологовміст стінової конструкції стає нижчим, ніж у випадку відсутності теплоізоляції (рис. 3.8). На внутрішній поверхні він змінюється при наявності теплоізоляційного шару в межах $W=0,7\dots 1,16\%$, а на зовнішній поверхні бетонної стіни – в межах $W=0,44\dots 0,55\%$ (рис. 3.8). При цьому розподіли температури по об'єму стіни стають більш рівномірними, а нерівномірність розподілу вологовмісту залишається, хоча її значення і знижуються.

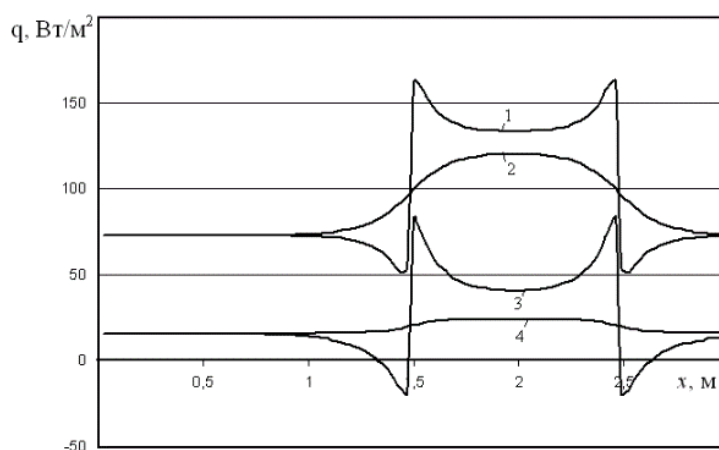


Рис. 3.7 Розподіли густини теплового потоку по внутрішній (1) та зовнішній (2) поверхнях стіни без теплоізоляції, та по внутрішній (3) і зовнішній (4) поверхнях стіни з теплоізоляцією

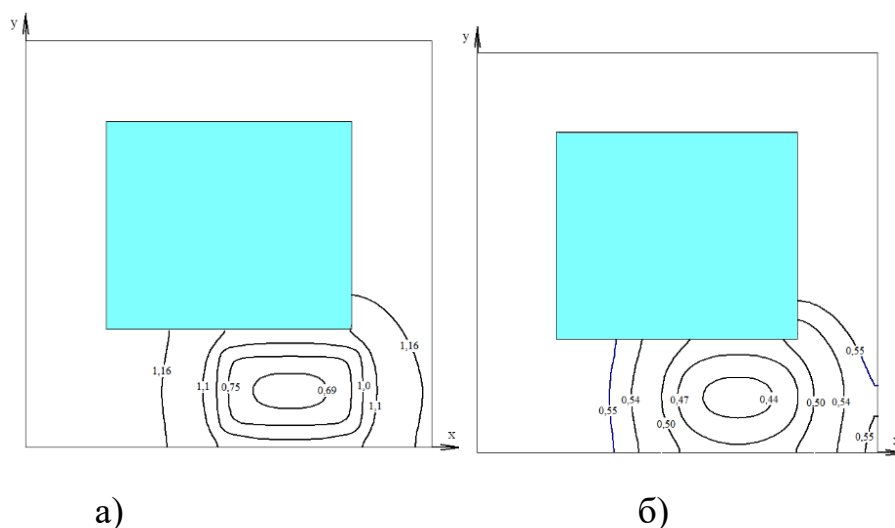


Рис. 3.8 Розподіл відносної вологості матеріалу W (%) по внутрішній (а) та по зовнішній (б) поверхнях стіни за умов наявності теплоізоляційного шару

3.4 Результати чисельного дослідження температурно-вологого стану огорожувальної конструкції будівлі.

За розглянутою сіточною моделлю чисельно досліджується динаміка температурно-вологого режиму стіни з керамічної цегли товщиною $\delta=0,2$ м. Пористість цього матеріалу становить $\varepsilon = 0,157$. Середній діаметр пор - $d_k = 10^{-5}$ м. Теплофізичні властивості розглянутого матеріалу відповідають властивостям керамічної цегли. Коефіцієнт проникності для газового середовища приймається $K_g = 2,2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$. Розглядається період часу з 0 год до 24 год. Температура зовнішнього повітря в 0 год. складає $0,755$ °С. Зміна температури зовнішнього повітря за добу відображена на рисунку 3.9. Такі погодні умови відповідають середині березня.

Всередині приміщення температура повітря постійна і дорівнює 20 °С. Вологовміст повітря (парціальна густина) зовні і всередині приміщення вважається однаковим, незмінним протягом доби і складає $\rho_{v,z} = \rho_{v,v} = 0,004515$ кг/м³. Це відповідає відносній вологості зовнішнього повітря $\varphi_3=0,88$ і відносній вологості повітря всередині приміщення $\varphi_3=0,26$. Далі з часом внаслідок зміни температури зовнішнього повітря змінюється і відносна вологість зовнішнього повітря.

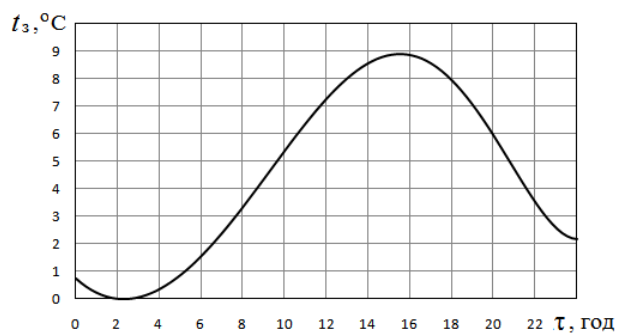


Рис. 3.9 Зміна у часі температури зовнішнього повітря.

Початковий розподіл температури твердого включення, а також рідини і газу в порах, яка в початковий момент часу вважається однаковою для всіх середовищ, відображено на рисунку 3.10.

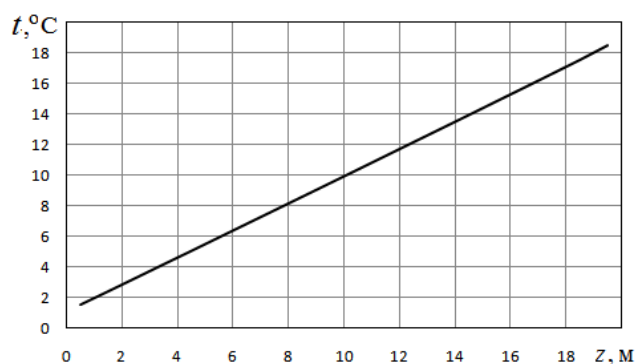


Рис. 3.10 Розподіл по товщині стіни температури в початковий момент часу $\tau=0$ год

Початковий розподіл питомого вмісту вологи по товщині стіни відображено на рисунку 3.11.

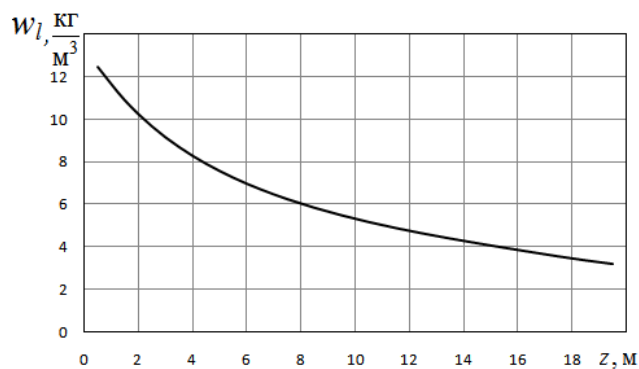


Рис. 3.11 Початковий розподіл питомого вмісту вологи по товщині стіни ($\tau=0$ год)

Розподіл по товщині стіни парціального тиску водяної пари в порах керамічної цегли в початковий момент часу відображено на рисунку 3.12.

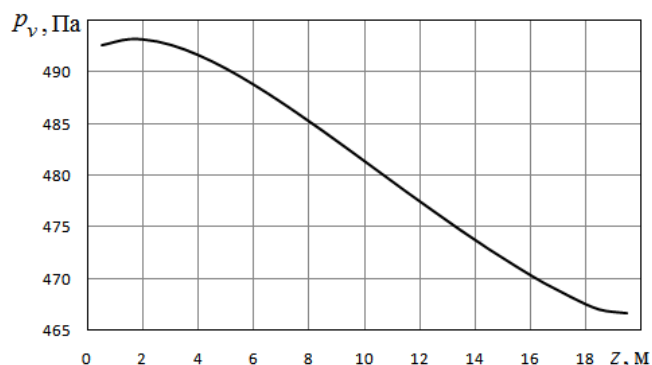


Рис. 3.12 Розподіл по товщині стіни парціального тиску водяної пари в порах керамічної цегли в початковий момент часу ($\tau=0$ год).

Як видно з рисунку 3.10, з 0 год. до 2 год. температура зовнішнього повітря дещо знижується з $0,755$ °С до 0 °С. Далі температура зовнішнього повітря починає поступово збільшуватися і в 14 год 30 хв. досягає максимуму $8,9$ °С. Потім температура повітря починає зменшуватися і до 24 год досягає $2,2$ °С.

Відповідно до характеру зміни температури зовнішнього повітря змінюється температура рідини в порах зовнішньої поверхні стіни ($z=0$) (рисунок 3.12, крива 1). Оскільки температура повітря всередині приміщення за умов задачі незмінна, температура рідини в порах внутрішній поверхні цегляної стіни змінюється несуттєво (рисунок 3.13, крива 2). А температура рідини в порах в середній частині стіни змінюється за характером, як середнє арифметичне між температурами зовнішньої і внутрішньої поверхонь стіни (рисунок 3.13, крива 3). Температура газової і твердої фаз змінюється подібно до того, як змінюється у часі температура рідкої фази. Різниці між температурами рідкої, твердої і газоподібної фаз відрізняється найсуттєвіше лише біля зовнішньої поверхні стіни. Але ці різниці не перевершують $0,1...0,2$ °С. На інших ділянках стіни ця різниця ще менше ($\sim 10^{-8}$ °С).

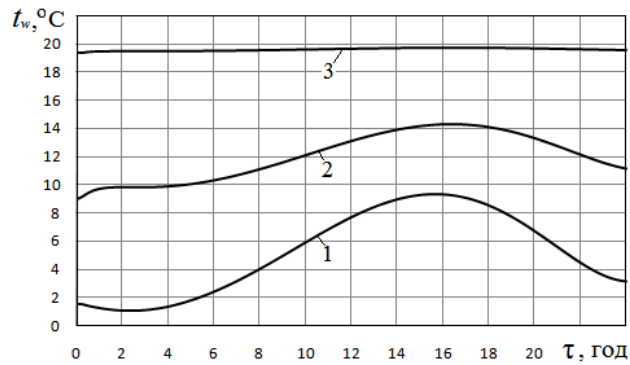


Рис. 3.13 Зміна у часі температури рідини в порах на різних ділянках стіни: 1- $z=0$ (зовнішня поверхня стіни); 2- $z = \delta/2$ м; 3- $z = \delta$ (внутрішня поверхня стіни)

Розподіли температури по товщині стіни в різні моменти часу наведено на рисунку 3.14.

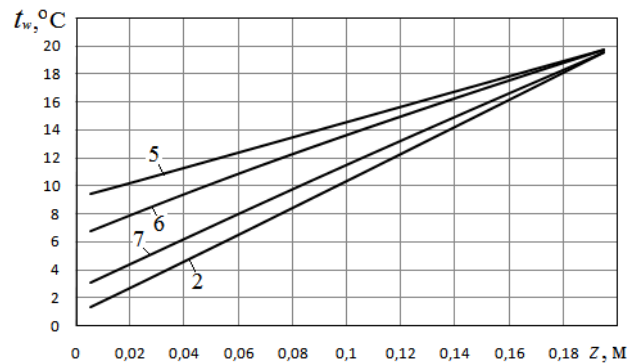


Рис. 3.14 Розподіл по товщині стіни температури матеріалу для різних моментів часу : 2 - $\tau=4$ год; 5 - $\tau=16$ год; 6 - $\tau=20$ год; 7 - $\tau=24$ год

Подібно до характеру зміни температури зовнішнього повітря змінюється також парціальний тиск водяної пари на зовнішній поверхні стіни (рисунок 3.15).

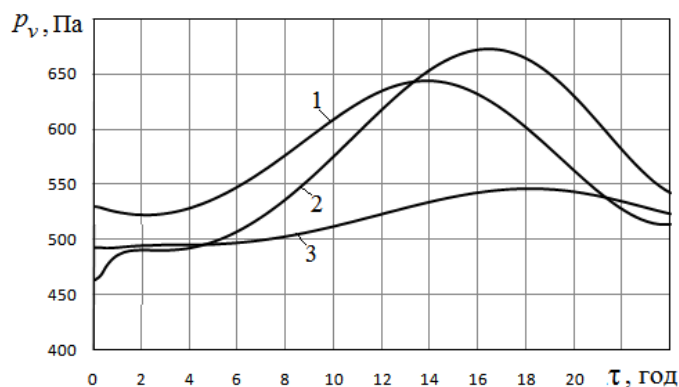


Рис. 3.15 Зміна у часі парціального тиску водяної пари на різних ділянках стіни: 1- $z=0$; 2- $z = \delta/2$; 3- $z = \delta$

Як видно з цього рисунку, від 0 год. до 2 год. парціальний тиск пари на зовнішній поверхні стіни зменшується від 530 Па до 522 Па. Далі, до 14 год., парціальний тиску збільшується до 644 Па. Далі з часом тиск пари зменшується до 513 Па. (рисунок 3.15, крива 1). В центральній частині стіни парціальний тиск водяної пари також з часом зростає (рисунок 3.15, крива 2). Але максимального значення 672 Па, яке вище, ніж максимальне значення тиску на зовнішній поверхні стіни, тиск досягає дещо пізніше, в 16 год 30 хв. Максимальний парціальний тиск водяної пари $z = \delta/2$ м вище, ніж при $z=0$ утворюється тому, що температури стіни при $z = \delta/2$ м вища, ніж при $z=0$.

На внутрішній поверхні стіни ($z = \delta$) також парціальний тиск водяної пари спочатку зростає, а потім дещо знижується. Але це відбувається не так інтенсивно, як для $z=0$ та $z = \delta/2$ м. При $z = \delta$ температура стіни, а також вміст водяної пари в пароповітряній суміші, що знаходиться в порах, також змінюється у часі не суттєво (рисунок 3.15, крива 3).

Розподіл парціального тиску водяної пари по товщині стіни в різні моменти часу наведено на рисунку 3.16.

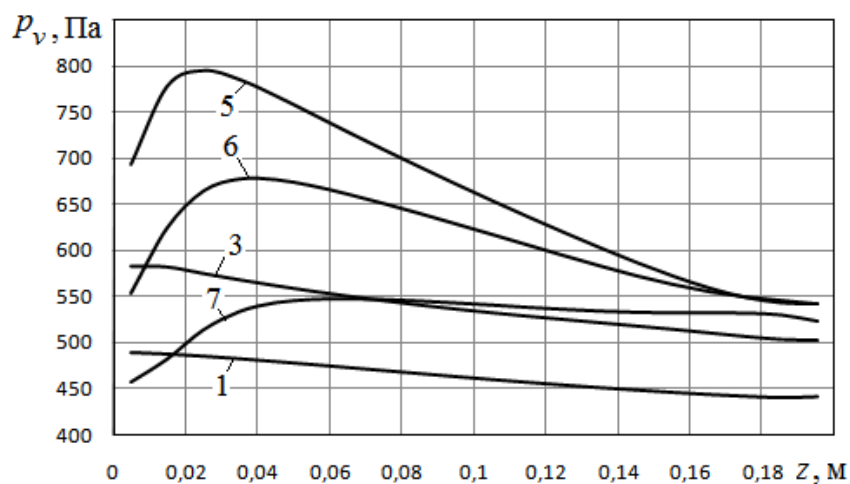


Рис. 3.16 Розподіл по товщині стіни парціального тиску водяної пари для різних моментів часу:

1 - $\tau=0$ год; 3 - $\tau=8$ год; 5 - $\tau=16$ год; 6 - $\tau=20$ год; 7 - $\tau=24$ год

З рисунку видно, що найбільш нерівномірно парціальний тиск водяної пари розподіляється при $\tau=16$ год (крива 5, рисунок 3.16). Максимальне значення парціального тиску, 794 Па, спостерігається при $z=0,025$ м. При $\tau=20$ год максимальне значення парціального тиску 678 Па спостерігається при $z=0,035$ м (крива 6, рисунок d11). В інші моменти часу парціальний тиску водяної пари нижче і розподіляється по товщині стіни більш рівномірно.

Зміну у часі відносної вологості повітря в порах наведено на рисунку 3.17.

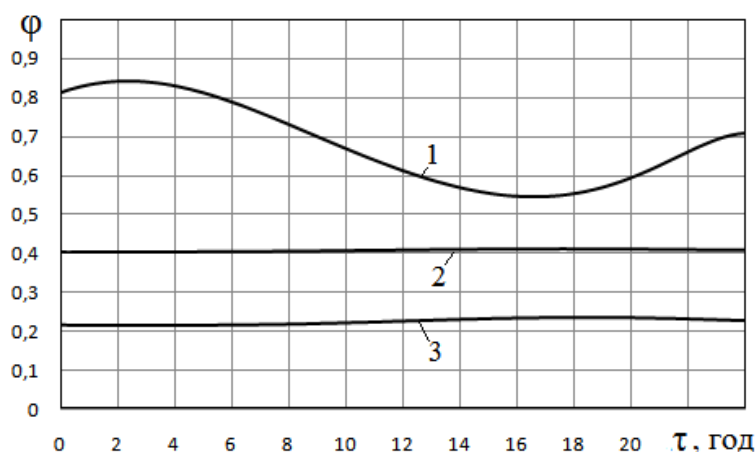


Рис. 3.17 Зміна у часі відносної вологості повітря в порах на різних ділянках стіни: 1- $z=0$; 2- $z = \delta/2$; 3- $z = \delta$

З цього рисунку видно, що найсуттєвіше відносна вологість повітря в порах матеріалу змінюється на зовнішній поверхні стіни ($z=0$) (рисунок 3.17, крива 1). В цій області найсуттєвіше на вологість повітря в порах впливає зміна відносної вологості зовнішнього повітря, яка змінюється внаслідок зміни температури. При цьому за умов задачі парціальна густина водяної пари в зовнішньому повітрі - постійна. При $z = \delta/2$ та $z = \delta$ відносна вологість повітря в порах змінюється у часі несуттєво (рисунок 3.17, криві 2, 3). При цьому при $z = \delta/2$ відносна вологість вища ($\varphi=0,4$), ніж при $z = \delta$ ($\varphi=0,22$) внаслідок того, що температура стіни при $z = \delta/2$ нижча, ніж при $z = \delta$.

Розподіл по ширині стіни відносної вологості повітря в порах для різних моментів часу наведено на рисунку 3.18.

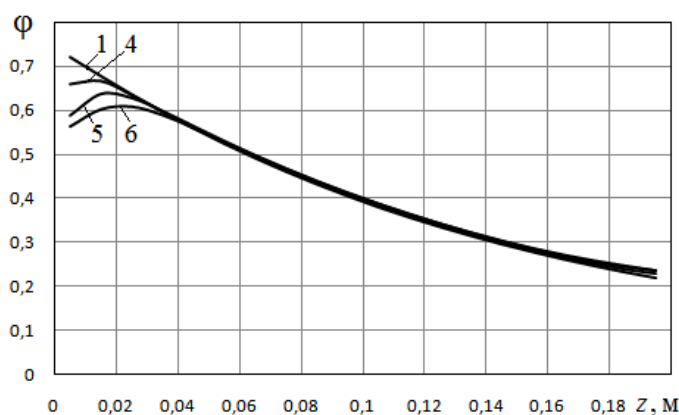


Рис. 3.18 Розподіл по товщині стіни відносної вологості повітря в порах матеріалу для різних моментів часу:

1 - $\tau=0$ год; 4 - $\tau=12$ год; 5 - $\tau=16$ год; 6 - $\tau=20$ год

З рисунку 3.18 видно, що зміна у часі відносної вологості повітря інтенсивніше за все відбувається при $z < 0,04$ м. При $z > 0,04$ м відносна вологість у часі змінюється несуттєво.

Зміну у часі висоти стовпчиків рідин h у вертикальних порах стіни на різних ділянках стіни наведено на рисунку 3.19. Зміна висоти стовпчиків рідини в капілярах по ширині стіни у різні моменти часу наведено на рисунку 3.20.

За величиною висоти стовпчиків рідини в капілярах визначається питомий вміст рідкої вологи в порах w_l . Зміна даної величини w_l , яка характеризує вологість матеріалу стіни, у часі на зовнішній і внутрішній поверхнях стіни, а також в її середній частині відображено на рисунку 3.21.

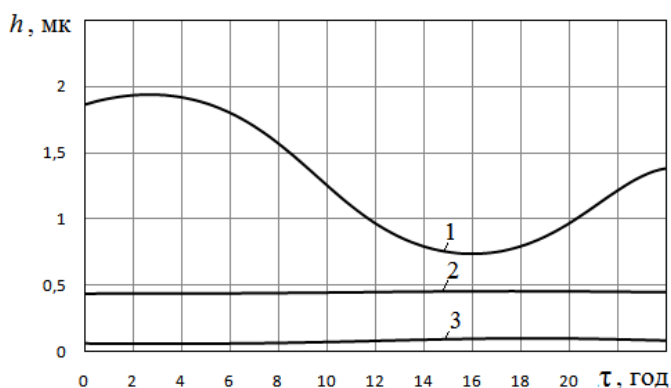


Рис. 3.19 Зміна у часі висоти стовпчиків рідини в порах на різних ділянках стіни: 1- $z=0$ (зовнішня поверхня стіни); 2- $z = \delta/2$ м; 3- $z = \delta$ (внутрішня поверхня стіни)

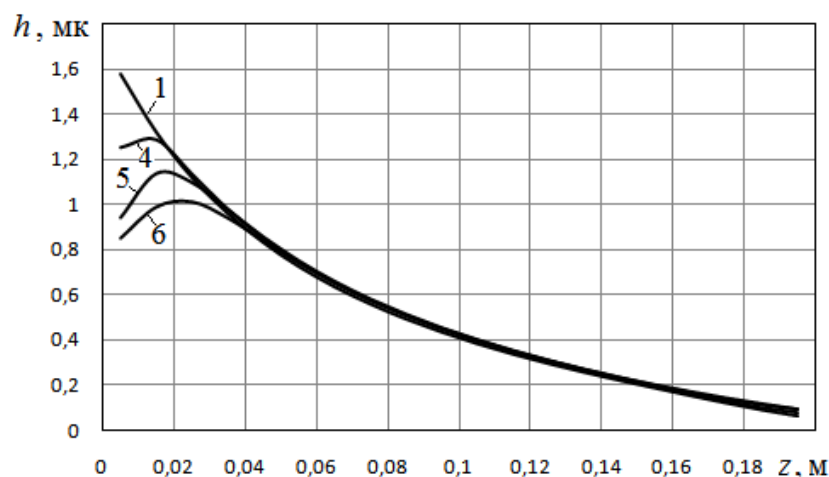


Рис. 3.20 Розподіл по товщині стіни висоти стовпчиків рідини в порах матеріалу для різних моментів часу: 1 - $\tau=0$ год; 4 - $\tau=12$ год; 5 - $\tau=16$ год; 6 - $\tau=20$ год

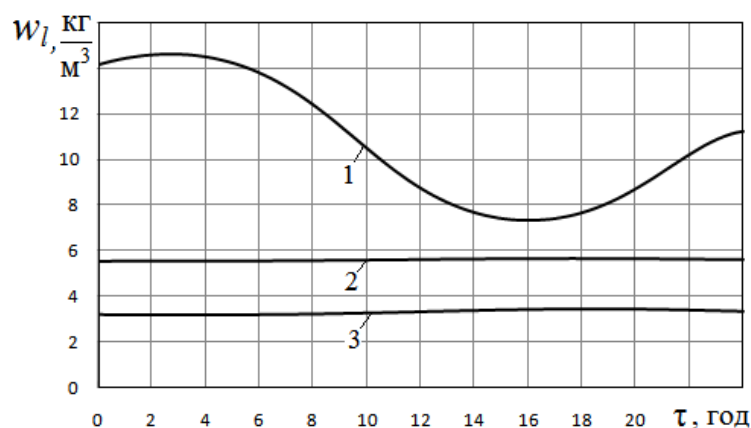


Рис. 3.21 Зміна у часі питомого вмісту вологи на різних ділянках стіни: 1- $z=0$ (зовнішня поверхня стіни); 2- $z = \delta/2$ м; 3- $z = \delta$ (внутрішня поверхня стіни)

З цього рисунку видно, що найбільш суттєво ця величина змінюється на зовнішній поверхні стіни. Спочатку вона збільшується з $14,17 \text{ кг/м}^3$ до $14,64 \text{ кг/м}^3$ внаслідок зменшення температури зовнішнього повітря, а потім, завдяки підвищенню температури зовнішнього повітря починає зменшуватися до $7,3 \text{ кг/м}^3$. Тобто з цієї поверхні в цей період часу рідина частково випаровується. Далі, після того, як температура зовнішнього повітря знову зменшується, вологовміст на поверхні зовнішній поверхні стіни підвищується до $11,2 \text{ кг/м}^3$.

Така залежність питомого вмісту рідкої води від часу спостерігається в області біля зовнішньої поверхні стіни. В середні ж її частині та на внутрішній поверхні вологовміст в стіні з часом практично не змінюється і становить $w_l \sim 5,5 \dots 5,6 \text{ кг/м}^3$ в середній частині стіни і $w_l \sim 3,2 \dots 3,45 \text{ кг/м}^3$ на внутрішній поверхні.

Це також видно і з рисунку 3.22, на якому наведено розподіл по товщині стіни питомого вмісту води в її матеріалі для різних моментів часу. З рисунку видно, що найсуттєвіші зміни питомого вологовмісту у часі відбуваються на відстані $z < 0,04 \text{ м}$. При $z > 0,04 \text{ м}$ вологовміст в стіні з часом практично не змінюється. Це означає, що вплив температури зовнішнього повітря на вологовміст у цегляній стіні товщиною $\delta = 0,2 \text{ м}$ відчувається на відносно невеликій відстані ($z < 0,04 \text{ м}$) від зовнішньої поверхні.

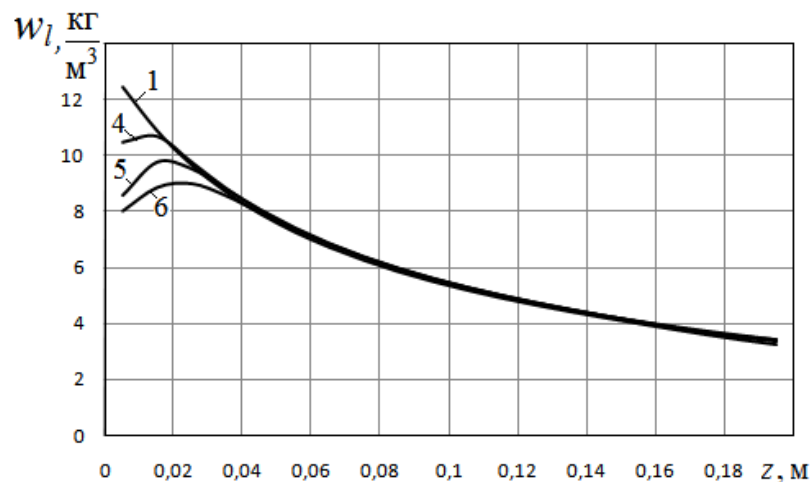


Рис. 3.22 Розподіл по товщині стіни питомого вмісту води в матеріалі для різних моментів часу: 1 - $\tau = 0$ год; 4 - $\tau = 12$ год; 5 - $\tau = 16$ год; 6 - $\tau = 20$ год

З результатів розрахункових досліджень випливає, що протягом доби відбувається як конденсація парів води на зовнішній поверхні стіни при зниженні температури зовнішнього повітря, так і випаровування води з поверхні при підвищенні температури. Цей процес відображається на рисунку 3.23, на якому наведено зміну у часі густини потоку водяної пари на зовнішній поверхні стіни ($z=0$). Позитивне значення цього потоку означає процес випаровування води, а негативне - процес конденсації води на поверхні стіни. Пара при випаровуванні

з поверхні стіни надходить в зовнішнє повітря. З рисунку 3.23 видно, що з 0 год. до 8-00 год відбувається конденсація вологи на поверхні зовнішній стіни. Максимальна (за модулем) густина потоку маси вологи, що конденсується, спостерігається о 2год. 15 хв. і складає $J_w = 11,9 \cdot 10^{-6}$ кг/(м²с) (знак величини - від'ємний). З 8-30 до 18-50 відбувається випаровування рідини з зовнішньої поверхні. Максимальний потік маси рідини, що випаровується складає $4,7 \cdot 10^{-6}$ кг/(м²с) (його знак - позитивний) і припадає на 12 -00. Після 19-00 знову починається процес конденсації вологи на поверхні внаслідок зменшення температури зовнішнього повітря.

Випаровування рідини, а також конденсація, відбувається також з поверхонь капілярів, що розташовані всередині матеріалу Зміну цієї величини у часі при $z=0$; $z = \delta/2$ та $z = \delta$ відображено на рисунку 3.24. З рисунку 3.24 видно, що інтенсивніше за все випаровування рідини всередині матеріалу відбувається біля зовнішньої поверхні стіни. Максимальний потік маси при цьому складає $J_{cap}=27,15 \cdot 10^{-9}$ кг/(м²с) о 12-00. До 4 год. відбувається конденсація вологи в стовпчиках рідини у вертикальних каналах капілярів, а з 4 год. до 18 год.45 хв. - випаровування. Потім знову відбувається конденсація.

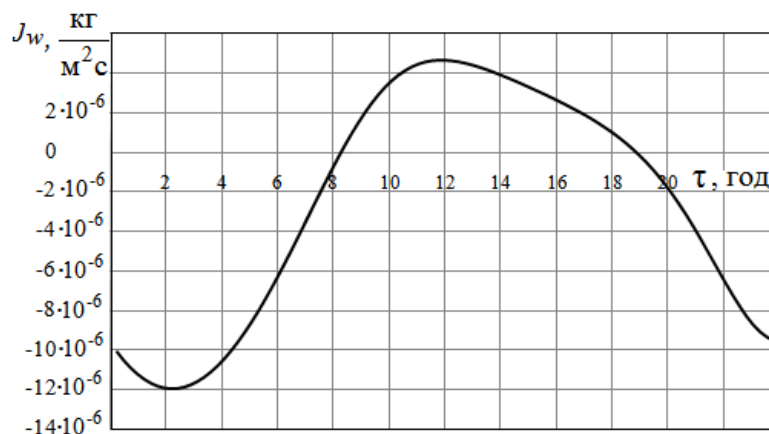


Рис. 3.23 Зміна у часі густини потоку водяної пари на зовнішній поверхні стіни ($z=0$)

На рисунок 3.24 наведено розподіл по товщині стіни густини потоку пара з поверхонь стовпчиків рідини всередину матеріалу для різних моментів часу.

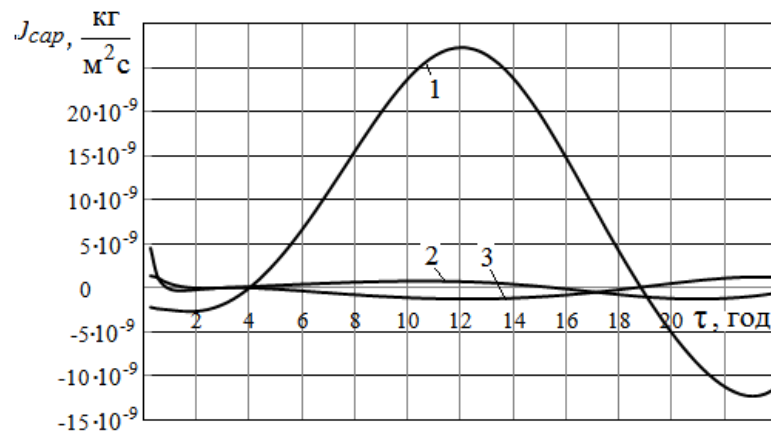


Рис. 3.24 Зміна у часі густини потоку водяної пари на поверхнях внутрішніх капілярів 1- $z=0$ (зовнішня поверхня стіни); 2- $z = \delta/2$ м; 3- $z = \delta$ (внутрішня поверхня стіни)

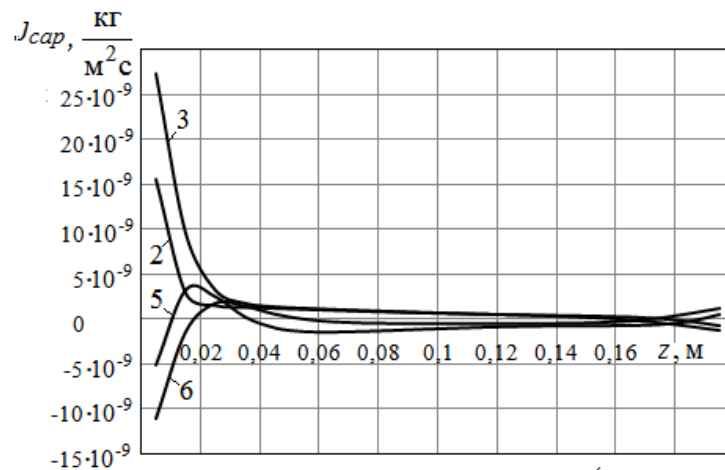


Рис. 3.25 Розподіл по товщині стіни густини потоку пара з поверхонь стовпчиків рідини всередину матеріалу для різних моментів часу : 2 - $\tau=8$ год; 3 - $\tau=12$ год; 5 - $\tau=20$ год; 6 - $\tau=24$ год

З рисунку 3.25 видно, що інтенсивніше за все випаровування і конденсація вологи всередині стіни відбувається при $z < 0,04$ м. На інших ділянках процеси фазового перетворення відбувається менш інтенсивно. При цьому протягом доби відбувається як випаровування, так і конденсація рідини всередині стіни. Одночасно на одній ділянці може бути випаровування, а на іншій - конденсація.

Зміна у часі сумарної густини теплових потоків на зовнішній та внутрішній поверхнях стіни відображена на рисунку 3.26.

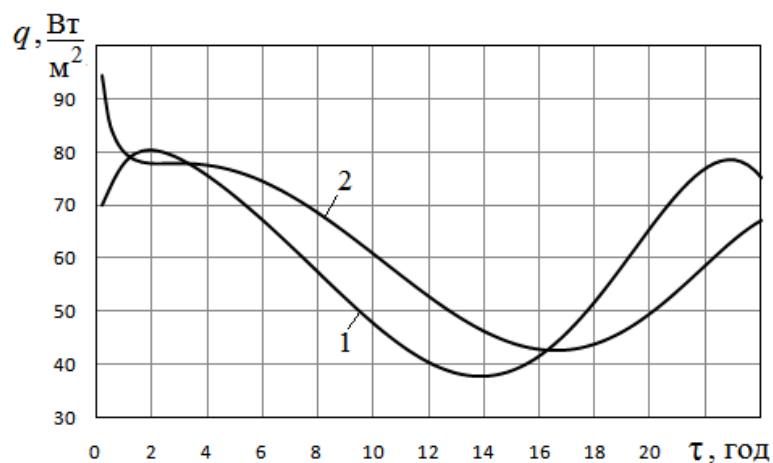


Рис. 3.26 Зміна у часі густини теплового потоку на зовнішній ($z=0$, крива 1) і внутрішній ($z= \delta$, крива 2) поверхнях стіни

Дані величини визначаються з урахуванням теплоти фазового переходу на поверхнях. З рисунку 3.26 випливає, що теплові потоки протягом доби змінюються від $q=80..90$ Вт/м² до $q=38$ Вт/м². Дані величини характеризують втрати теплоти з приміщення назовні. Найменші втрати теплоти спостерігаються о 14 год на зовнішній поверхні стіни (крива 1, рисунок 3.26). На внутрішній поверхні стіни мінімальна густина теплового потоку спостерігається о 16 год. 40 хв. і складає 42,8 Вт/м² (крива 2, рисунок 3.26).. З порівняння кривих 1 та 2 на рисунку 3.26 видно, що в один і той же самий момент часу густини теплових потоків на внутрішній і зовнішній поверхнях стіни не збігаються. Це є наслідком того, що тепловий потік, який надходить на внутрішню поверхню стіни з боку приміщення, не тільки переноситься до зовнішньої поверхні і надходить в зовнішній простір, а також поглинається стіною, підвищуючи її температуру, і витрачається на фазовий перехід (випаровування та конденсація рідини).

Висновки до розділу

1. У розділі досліджено процеси теплопередачі через теплоізовані стінові конструкції з урахуванням температурно-вологісного стану матеріалів та впливу зовнішніх умов експлуатації.
2. Проаналізовано основні підходи до моделювання теплопередачі через багат шарові стіни. Показано, що стаціонарні моделі є доцільними для

інженерних розрахунків, тоді як для більш точного опису реальних умов експлуатації необхідно застосовувати нестационарні та чисельні моделі, які дозволяють враховувати теплову інерцію матеріалів і змінність зовнішніх впливів.

3. Розроблено математичну модель тепломасопереносу в капілярно-пористих матеріалах, яка базується на рівняннях теплопровідності, дифузії водяної пари та переносу рідкої вологи. Запропоновано спрощену модель, що враховує переважно дифузійний перенос водяної пари, що дозволяє підвищити ефективність чисельних розрахунків без суттєвої втрати точності.
4. Виконано чисельне моделювання температурного та вологісного стану огорожувальних конструкцій із застосуванням методу скінчених різниць. Показано, що цей підхід забезпечує достатню точність розрахунків і дозволяє аналізувати вплив різних факторів на тепловий режим конструкцій.
5. Встановлено, що застосування зовнішнього теплоізоляційного шару суттєво підвищує температурний рівень несучої стінової конструкції, зменшує градієнти температури та сприяє зниженню тепловтрат через огорожувальні конструкції.
6. Показано, що застосування теплоізоляції сприяє зменшенню ймовірності конденсації водяної пари у товщі огорожувальної конструкції та зниженню її вологовмісту, що позитивно впливає на довговічність будівельних матеріалів.
7. Встановлено, що характер розподілу вологи у стіновій конструкції значною мірою залежить від паропроникності матеріалів. При використанні утеплювачів з високою паропроникністю (наприклад, мінеральної вати) забезпечується ефективне видалення водяної пари назовні, тоді як матеріали з низькою паропроникністю (наприклад, пінополістирол) можуть сприяти накопиченню вологи в конструкції.
8. За результатами тривимірного моделювання показано, що на розподіл температури та вологості в стінових конструкціях істотно впливають локальні джерела тепла (радіатори), геометрія конструкцій та наявність теплоізоляції.

9. Встановлено, що наявність теплоізоляційного шару на зовнішній поверхні стіни забезпечує підвищення температури її внутрішніх шарів, зменшення густини теплових потоків через конструкцію та більш рівномірний розподіл температури в об'ємі стіни.
10. Чисельні дослідження динаміки температурно-вологісного режиму цегляної стіни показали, що зміни температури зовнішнього повітря протягом доби призводять до відповідних змін температури та вологості матеріалу, причому найбільш інтенсивні коливання спостерігаються у зоні, близькій до зовнішньої поверхні конструкції.
11. Встановлено, що протягом доби на зовнішній поверхні стіни можуть відбуватися як процеси конденсації водяної пари при зниженні температури зовнішнього повітря, так і процеси випаровування вологи при її підвищенні, що впливає на теплові потоки та загальний тепловологісний режим огорожувальної конструкції.
12. Отримані результати чисельного моделювання дозволяють оцінити вплив теплоізоляції та зовнішніх кліматичних умов на температурно-вологісний стан огорожувальних конструкцій та можуть бути використані при проектуванні енергоефективних будівель і систем термомодернізації.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ СТІНОВІ ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

4.1. Програма та методика експериментальних досліджень

Оскільки заходи з термореновації потребують значних капіталовкладень, виникає необхідність проведення порівняльного аналізу теплотехнічної та економічної ефективності застосування різних теплоізоляційних матеріалів. Водночас важливо враховувати довговічність покриттів за різних умов експлуатації. У зв'язку з цим актуальним є виконання різноваріантної термореновації окремих приміщень і проведення експериментальних досліджень їх повітряно-температурних режимів та відповідних тепловтрат через огороджувальні конструкції.

На вирішення зазначеної проблеми було спрямовано інноваційний проєкт, метою якого є обґрунтування шляхів зменшення теплоспоживання існуючих адміністративних будівель шляхом зниження тепловтрат за рахунок впровадження оптимальних варіантів термореновації огороджувальних конструкцій, а також дослідження ефективності відповідних заходів у процесі довготривалої експлуатації будівлі.

Об'єктом дослідження та місцем застосування результатів проєкту була споруда корпусу №1 Інституту технічної теплофізики НАН України по вул. Булаховського, 2 в м. Київ. Споруда представляє собою триповерхову громадську будівлю, яка побудована за типовим проєктом № 416-3-3/70 1966 р. та здана в експлуатацію у 1973 р. Зовнішні стіни корпусу виконані з армованих керамзитобетонних панелей серії «ИИ-04-5 Випуск 1» товщиною 0,24 м із шаром теплоізоляції всередині та ззовні вкриті облицювальною плиткою. Вікна виконані у відповідності з ГОСТ 11214-65 з подвійним склінням у дерев'яних та частково металопластикових рамах. Вхідні двері виконані з металопластикових конструкцій. Будівля має плоский дах, що складається з залізобетонних плит, які вкриті шаром руберойду та утеплений шаром скловолкна. Перекриття підлоги складаються з залізобетонної багатопустотної плити товщиною 300 мм, шару цементно-піщаної

стяжки, верхній шар – лінолеум, який має товщину 50 мм. Споруда також не має підвального приміщення. Ці фактори свідчать про відсутність надійної теплоізоляції першого та третього поверхів споруди. Детальний опис конструктивних елементів будівлі наведений в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Опис конструктивних елементів

Конструктивні елементи	Опис
Фундамент	Стрічковий, бетонні блоки
Дах	Рулонний руберойд по залізобетонних плитах
Стіни	Керамзитобетонні панелі
Міжповерхові перекриття	Багатопустотні залізобетонні плити
Перегородки	Залізобетонні панелі
Вікна	Подвійні - дерев'яні, пластикові
Сходи	Збірні залізобетонні площадки

Приміщення в будівлі відрізняються за площею, кількістю вікон та кількістю опалювальних пристроїв. Кімнати розміром 6х3х3 м містять одне вікно розміром 2,3х1,720х0,078 м та один опалювальний пристрій. Кімнати розміром 6х6х3 містять два вікна аналогічного розміру та два таких самих опалювальних пристроїв. Будівля просторово розташована зі сходу на захід, має продовжені північний та південний фасади. Капітальний ремонт огорожувальних конструкцій протягом останніх років не проводився.

Після експлуатації споруди протягом останніх років теплоізоляційна спроможність вікон та зовнішніх стін суттєво зменшилась та не відповідає сучасним вимогами щодо енергоефективності будівлі. Крім того, передбачені за проектом 1966 р. заходи щодо теплоізоляції споруди орієнтувалися на існуючу в той час систему тепlopостачання та рівні цін на енергоносії.

Важливу роль в підвищенні енергетичної ефективності споруд відіграє застосування безконтактних (тепловізійних, пірометричних) інфрачервоних методів контролю та діагностики. Зазначений метод тепловізійного обстеження застосовується для визначення розподілу температур на зовнішніх та внутрішніх поверхнях ОК, а також аналізу систем опалення і повітрообміну будівлі корпусу № 1.

За результатами тепловізійного обстеження, які виконані за допомогою тепловізора FLUKE TI-50, визначили ділянки поверхонь огорож, температура яких суттєво відрізняється від температури повітряного середовища. можливість виявити ділянки з найбільшими рівнями тепловтрат з поверхонь огорож (рис. 4.1). Це свідчить про високі значення теплового потоку на цих поверхнях, що є наслідком низького температурного опору ОК

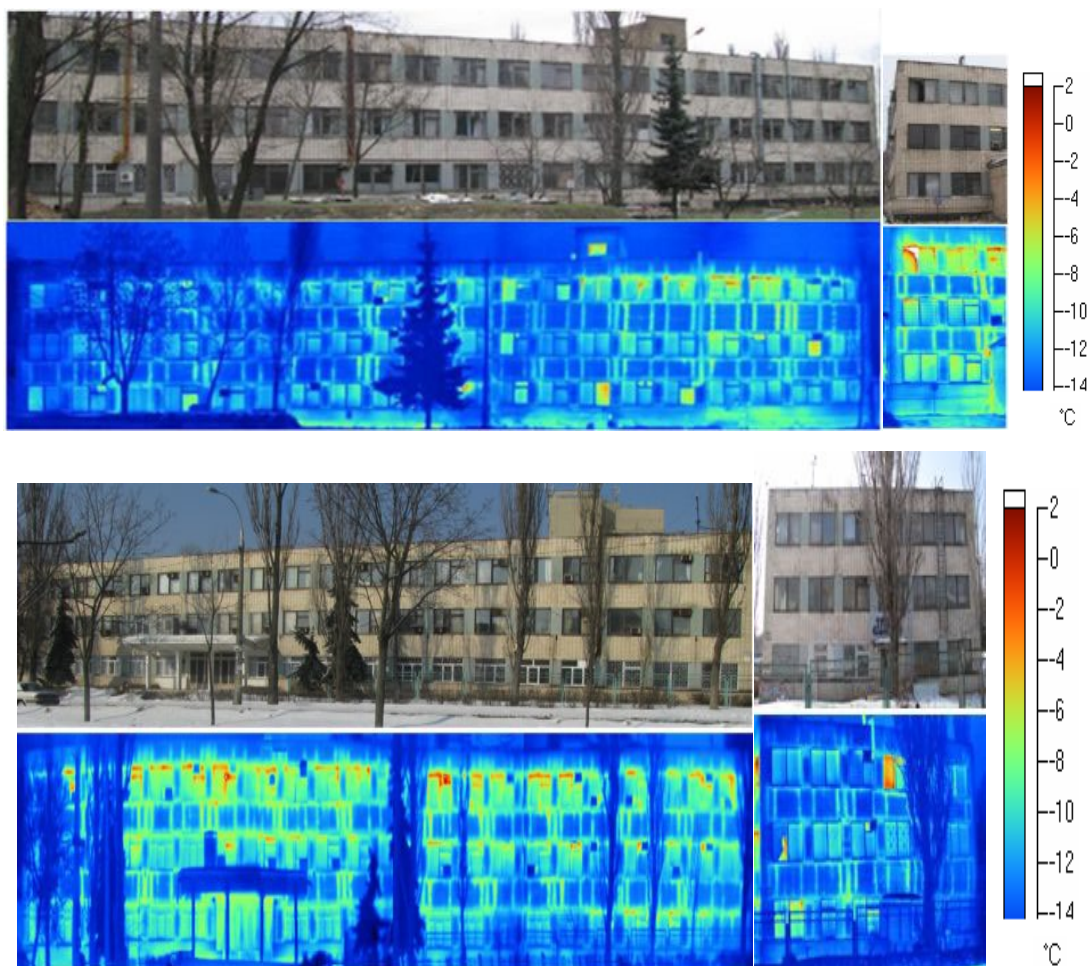


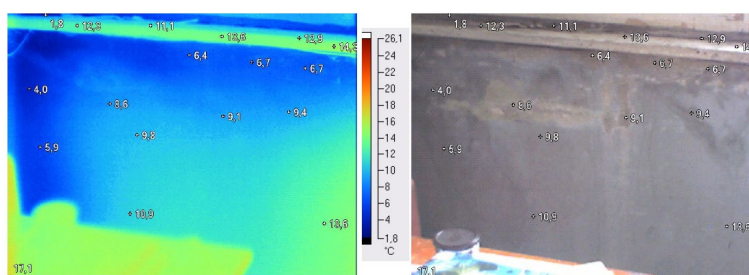
Рис. 4.1 Тепловізійне обстеження зовнішніх поверхонь ОК будівлі

За допомогою проведеного тепловізійного обстеження будівлі було отримано загальну візуальну картину розподілу температури на поверхнях досліджуваного об'єкту. Це дозволило виявити ділянки підвищених тепловтрат через ОК, дефекти панелей, місця можливої конденсації вологи (ділянки із зниженою температурою), порушення в системі опалення. До них відносяться: вікна, дах, стики панелей. Ці ділянки характеризуються підвищеними значеннями температури на зовнішніх поверхнях (до $+2^{\circ}\text{C}$) і зниженими на внутрішніх, що свідчить про відносно низький

термічний опір цих ділянок. Але для визначення кількісних, а не лише якісних характеристик температурного режиму будівлі, необхідно застосовувати більш точні методи і вимірювальні прилади.

Унаслідок значної нерівномірності розподілу температури на зовнішніх і внутрішніх поверхнях огорожувальних конструкцій (рис. 4.2) на термограмах чітко простежується структура панелей, а також якість закладення міжпанельних швів. Як видно з термограм, на ділянках огорожувальних конструкцій, поблизу яких розташовані опалювальні прилади, спостерігається суттєве підвищення температури як на внутрішній, так і на зовнішній поверхнях.

Це свідчить про відсутність теплозахисних екранів у зоні за радіаторами на внутрішній поверхні, а також про низький опір теплопередачі стінової конструкції в цих ділянках. Світлі відблиски на ділянках вікон, що спостерігаються на термограмах, зазвичай свідчать про відкриті кватирки або стулки вікон.



а)

б)

Рис. 4.2 Внутрішня поверхня зовнішньої стінової огорожувальної конструкції:

а) термограма; б) фотографія

На рис. 4.3 відображено термограму чавунного радіатора, який на момент тепловізійного обстеження використовувався як опалювальний прилад в системі тепlopостачання будівлі. У нижній частині радіатора спостерігається область зі зниженим рівнем тепловіддачі, що, можливо, є наслідком його часткового засмічення шламом внаслідок довготривалої експлуатації. Через низьку ефективність роботи чавунних радіаторів, вони, при частковій термомодернізації системи опалення досліджуваної будівлі, були замінені на сучасні сталеві панельні конвектори. Шляхом радіаційної складової теплообміну такий прилад віддає до

На підставі експериментального та розрахункового визначення тепловтрат через огорожувальні конструкції встановлено їх незадовільний теплотехнічний стан і невідповідність сучасним вимогам щодо теплоізоляції. У зв'язку з цим огорожувальні конструкції корпусу потребували термореновації.

З урахуванням отриманих результатів дослідження, з метою обґрунтування заходів зі зменшення теплоспоживання в існуючих будівлях (за умови дотримання санітарно-гігієнічних норм і забезпечення належного рівня теплового комфорту), в Інституті технічної теплофізики НАН України проведено часткову термомодернізацію адміністративної будівлі корпусу № 1 за адресою: вул. Булаховського, 2, м. Київ.

Термореновацію виконано шляхом заміни в окремих приміщеннях другого поверху старих вікон на сучасні однокамерні та двокамерні склопакети з різними значеннями термічного опору, а також шляхом улаштування теплоізоляційних покриттів із матеріалів різних типів на частині зовнішньої поверхні огорожувальних конструкцій з боку північного фасаду корпусу (рис. 4.5). Застосовані теплоізоляційні матеріали відрізняються за коефіцієнтами теплопровідності та іншими теплофізичними характеристиками.



Рис. 4.5 Схема утеплення огорожувальних конструкцій частини поверху корпусу №1 ІТТФ НАН України

Схема утеплення огорожувальних конструкцій частини поверху корпусу №1 ІТТФ НАН України представлена на рис. 4.6.

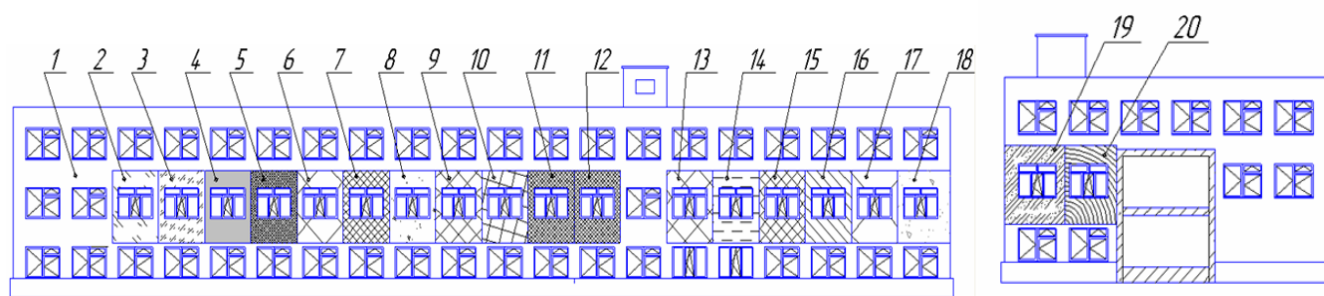


Рис. 4.6 Схема різноваріантної термореновації огорожувальних конструкцій частини поверху північного фасаду адміністративної будівлі:

1 – кімната 209; 2, 3 – кімната 208; 4 – кімната 207; 5 – кімната 206; 6, 7 – кімната 205; 8, 9 – кімнати 204, 204а; 10 – кімната 203; 11, 12 – кімнати загального користування; 13 – кімната 202; 14 – кімната 202а; 15 – кімната 201; 16, 17 – кімната 222; 18, 19, 20 – кімната 221

Найкращими вважаються вироби з мінеральної вати (скловати та базальтової вати різної густини). Зазначені матеріали характеризуються найбільш високими показниками з екологічної та пожежної безпеки, хоча за теплоізоляційною здатністю дещо поступаються органічним матеріалам, таким, як пінополістирол та пінополіуретан. Для визначення теплотехнічних характеристик кожного з варіантів термореноваційних заходів застосовується система вимірювання температури та густини теплового потоку на різних ділянках поверхонь огорожувальних конструкцій (Таблиця 4.2).

Таблиця 4.2. Перелік варіантів теплоізоляційного шару

№ каб	Варіант теплоізоляційного шару та метод кріплення	Густина, кг/м ³	Теплопровідність $\lambda_{\text{пост}}$, Вт/(м·К)
201	Пінополістирольні екструзійні плити Техноплекс («Техноніколь»). Метод кріплення – скріплена теплоізоляція	26-35	0,032
202	Напилений пінополіуретан системи «Еластопор Н»	35	0,022
202 а	Пінополістирольні плити (ППС-35). Метод кріплення – скріплена теплоізоляція	35	0,037
203	Теплоізоляційні сендвіч-панелі зі скловатою	130	0,35

204	Вентильований фасад з покриттям профнастилу та теплоізоляційним матеріалом – скловатою	130	0,35
204 а	Вентильований фасад з покриттям профнастилу та теплоізоляційним матеріалом – базальтовою ватою	80	0,038
205	Вентильований фасад з покриттям профнастилу. Базальтові плити (ліва сторона кімнати) та мати (права сторона) виробництва Чернівецького заводу теплоізоляційних матеріалів «РОТІС»	130	0,040
206	Вентильований фасад з покриттям полікарбонату та теплоізоляційним матеріалом - базальтова вата густиною 130 кг/м ³ товщиною 100 мм.	131-159	0,038
207	Вентильований фасад з покриттям полікарбонату та теплоізоляційним матеріалом - плити піноскла завтовшки 100 мм	110-150	0,045-0,052
208	Полікарбонатний лист з щепленим всередині повітряним прошарком (ліва сторона) та скловата товщиною (права сторона) з застосуванням вентильованого фасаду з полікарбонатним покриттям	130	0,35
209	Без теплоізоляційного покриття	-	-
221	Північний фасад – піноскло, ліва сторона торцевої стіни – вермікуліт-перлітова штукатурка «Тепловер», права сторона торцевої стіни – енергозберігаюча фарба «Ізоллат»	110-150 350	0,045-0,052 0,090
222	Базальтова вата 145 кг/м ³ (ділянка стіни біля лівого вікна) та 90 кг/м ³ (ділянка стіни біля правого вікна). Метод кріплення– скріплена теплоізоляція	зліва – 145 справа – 90	0,038
МЗ К	Пінопістирольні плити (ППС-15). Метод кріплення – скріплена теплоізоляція	15	0,042
МЗ К	Пінопістирольні плити (ППС-25). Метод кріплення– скріплена теплоізоляція	25	0,039

4.2 Вимірювальний комплекс

Для визначення теплотехнічних характеристик кожного з варіантів термореноваційних заходів застосовується система вимірювання температури та густини теплового потоку на різних ділянках поверхонь огороджувальних конструкцій. Вимірювання здійснюється шляхом встановлення перетворювачів теплового потоку з вмонтованим платиновим термометром опору (ПТП-ПТО) та мідних термометрів опору типу ТСМ-205.

Перетворювач теплового потоку (ПТП), що є оригінальною розробкою відділу теплотерії Інституту технічної теплофізики НАН України, виконано у вигляді жорсткої пластини круглої або прямокутної форми, поверхня якої має високий ступінь чорноти. Датчик складається з батареї ідентичних диференціальних біметалічних термоелементів, зафіксованих в електроізоляційному компаунді.

Оскільки температурне поле огорожувальних конструкцій, а також розподіл густини теплового потоку по їх поверхнях є суттєво нерівномірними, ПТП-ПТО та мідні термометри опору встановлюються на внутрішніх і зовнішніх поверхнях стін, а при утепленні – між стіною та теплоізоляційним шаром. Датчики розташовуються поруч на одній осі, перпендикулярній до поверхні стіни. Місця їх встановлення визначаються за результатами тепловізійного обстеження.

Відносну вологість у товщі теплоізоляційних матеріалів вимірюють за допомогою датчиків вологості (ДВ). Температура та відносна вологість повітря у приміщенні додатково реєструються за допомогою Testo 174Н. Усі прилади об'єднані в єдину вимірювальну систему. Сигнали з датчиків через вторинні прилади та конвертер передавання даних надходять до персонального комп'ютера для подальшої обробки.

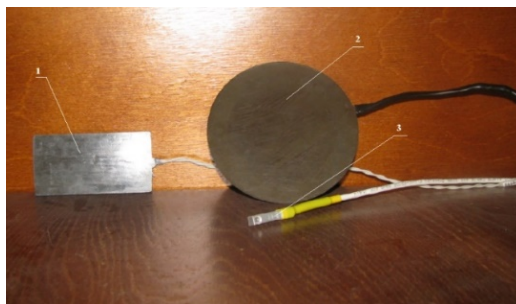


Рис. 4.7 Перетворювач теплового потоку прямокутного (1), круглого (2) перерізу з вмонтованими платиновими термометрами опору та мідний термометр опору (3)

Розташування цих вимірювальних пристроїв на поверхнях огорож досліджуваної будівлі наведено на рис. 4.8 та 4.9.

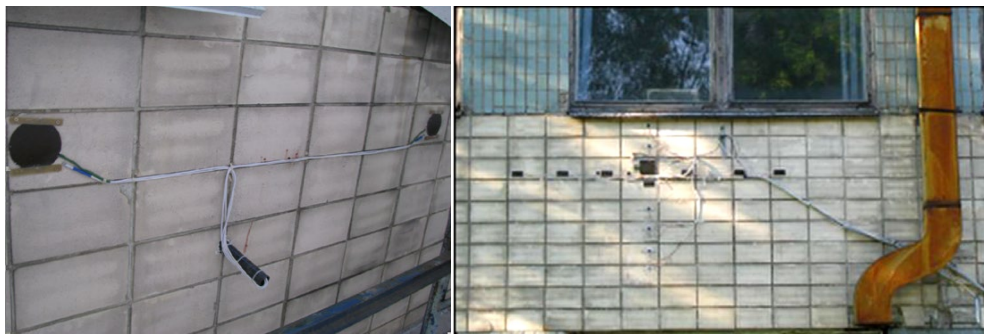


Рис. 4.8 Установка датчиків ПТП ПТО та ТСМ на зовнішній поверхні зовнішньої стінової ОК

Зазначені датчики об'єднуються в одиничну вимірювальну систему (ОВС). Через мідний провід МГТФе 2×0,12 ПТП підключаються до восьмиканальних аналого-цифрових перетворювачів «Експерт» (рис. 4.9 а), а ПТО й ТСМ – до приладів вимірювання і контролю температури УКТ-38 (рис. 4.9 б). Всі датчики через вторинні пристрої та конвертор USB в RS-232/422/485 з автоматичним контролем за напрямком передавання даних з'єднуються з персональним комп'ютером. При цьому за допомогою спеціального програмного забезпечення отримані дані автоматично опрацьовуються в режимі реального часу для їх подальшого аналізу. Схема збору та обробки інформації з вимірювальних датчиків представлена на рис. 4.10.



а)



б)

Рис. 4.9 Вимірювальні комплекси

- а) восьмиканальний аналого-цифровий перетворювач «Експерт»;
- б) восьмиканальний пристрій виміру та контролю температури УКТ-38

Сигнали із заданим часовим кроком 10 хвилин від всіх датчиків записувалися переносним 96-ти каналним блоком теплової реєстрації (БТР), розробленим в Інституті технічної теплофізики НАН України, який дозволяє в умовах реальної експлуатації будівлі досліджувати температурний стан стінової конструкції. Головним блоком є комплектація шістьох восьмиканальних приладів вимірювання та контролю температури УКТ-38 для датчиків температури та шести восьмиканальних аналого-цифрових перетворювачів «Експерт» для датчиків теплових потоків. До цих приладів додавалась також відповідна кількість датчиків температури та теплового потоку.

Всі ПТП-ПТО та МТО були встановлені на ОК таким чином, щоб уникнути впливу джерел теплоти та вологовиділення, а також припливних та витяжних отворів у центрі характерної термічно однорідної ділянки.

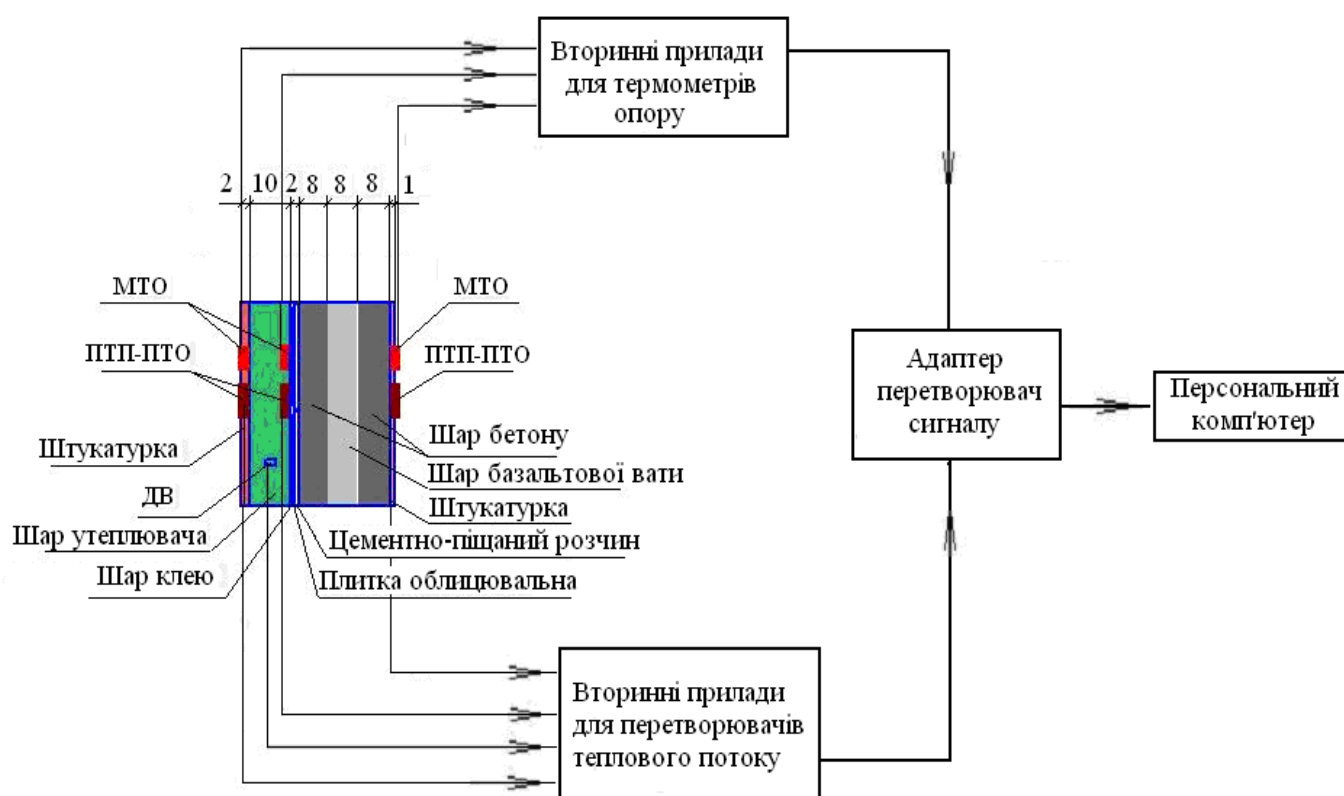


Рис. 4.10. Схема експериментального вимірювального комплексу для дослідження тепло-вологпереносу через термомодернізовану стінову конструкцію

4.3. Експериментальне визначення температурного і вологісного стану огороджувальних конструкцій в залежності від зовнішніх умов та типу теплоізоляційного матеріалу

У даному підрозділі розглянуто результати експериментального дослідження температурно-вологісного стану тришарової стінової конструкції з додатковим теплоізоляційним шаром на її зовнішній поверхні. На основі отриманих результатів визначено залежність температурних і вологісних характеристик елементів цієї конструкції від погодних умов у зимовий період.

У режимі реального часу визначалися густини теплових потоків на поверхнях шарів досліджуваних ділянок огороджувальних конструкцій, температури їх поверхонь, а також відносна вологість повітря ϕ у товщі теплоізоляційних матеріалів. Водночас здійснювалася безперервна реєстрація температури та відносної вологості повітря всередині приміщення, до якого належать досліджувані конструкції, а також відповідних параметрів зовнішнього повітря.

Під час теплотехнічних досліджень ділянок огороджувальних конструкцій із різноваріантною термомодернізацією, що виконуються з метою оцінювання їх теплоізоляційних характеристик, проводяться тривалі вимірювання густини теплового потоку через конструкцію, температур поверхонь її шарів, а також температури повітря внутрішнього і зовнішнього середовища. На основі отриманих даних визначаються середні значення параметрів і розраховується коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного шару конструкції.

Перші експериментальні дослідження виконано у лютому 2013 року, за результатами яких визначено фактичні значення опору теплопередачі огороджувальних конструкцій з різними варіантами теплоізоляції. Повторні вимірювання проведено в січні 2019 року.

На рис. 4.11–4.26 наведено дані для питомого теплового потоку та коливання температур через фасадну бетонну сендвіч-панель адміністративного корпусу, утеплену різними шарами утеплювачів завтовшки 100 мм в період 16-17 лютого 2013 року та 15-16 січня 2019 року.

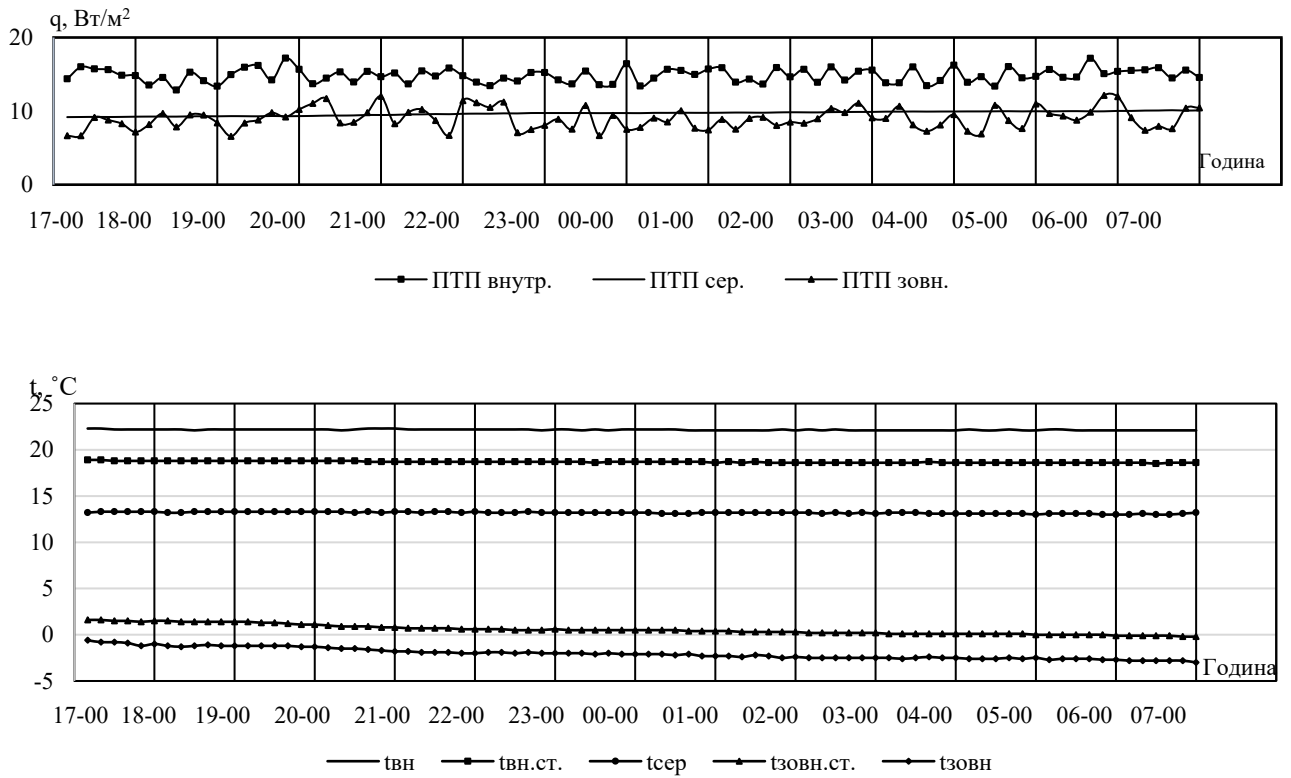


Рис. 4.11 Коливання температур та густини теплового потоку термо модернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої піносклом в період 16-17 лютого 2013 року

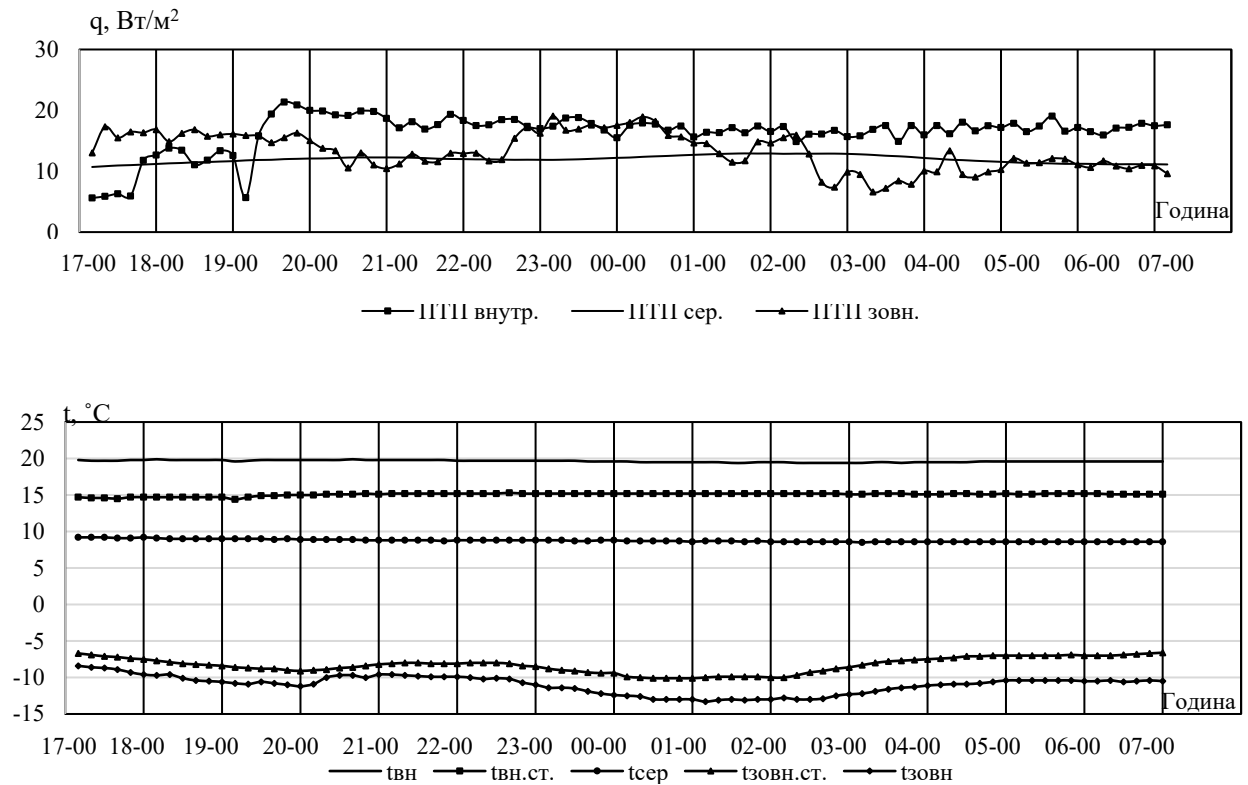


Рис. 4.12 Коливання температур та густини теплового потоку термо модернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої піносклом в період 15-16 січня 2019 року

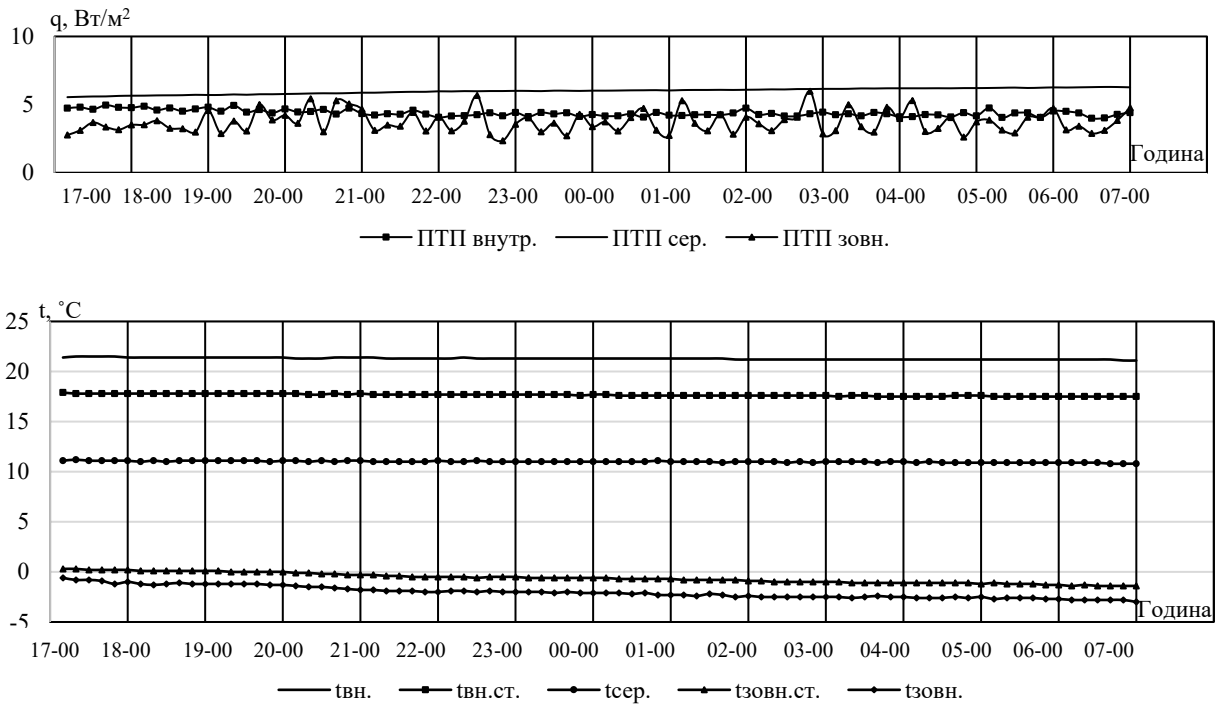


Рис. 4.13 Коливання температур та густини теплового потоку термомодернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої базальтовою ватою «Техноніколь» в період 16-17 лютого 2013 року

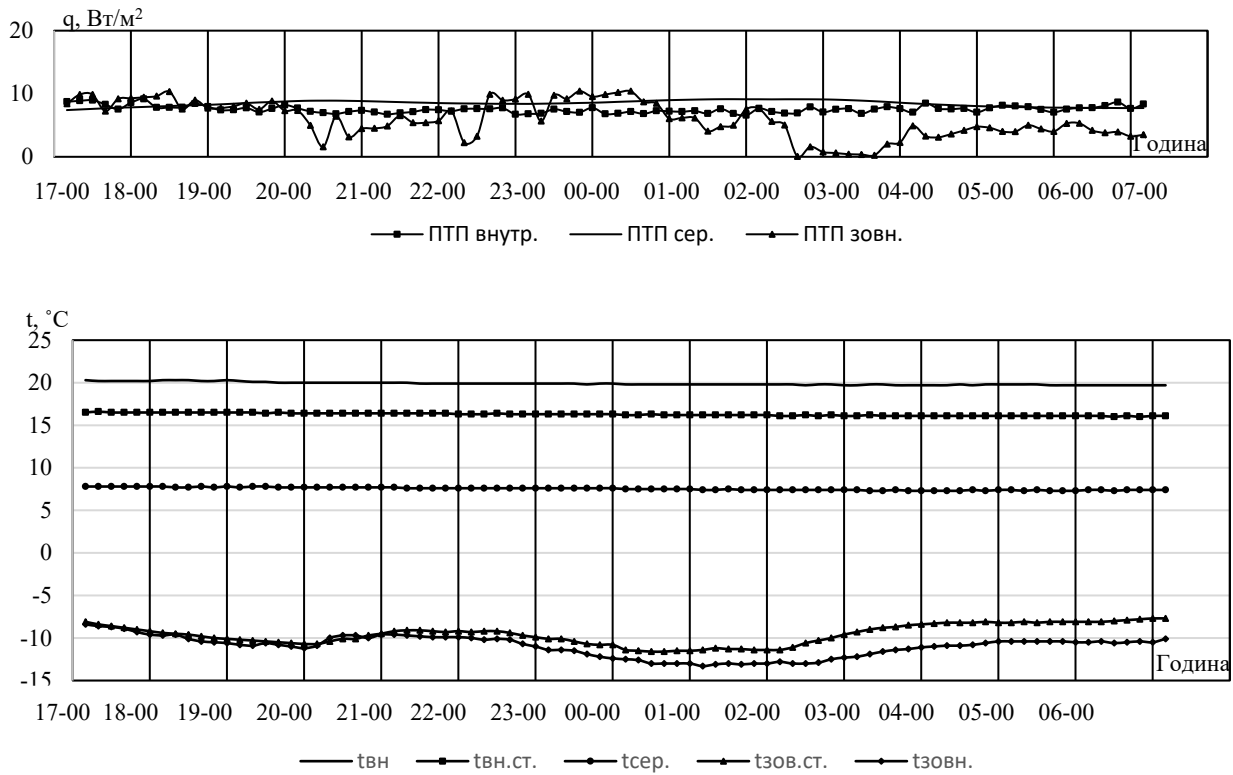


Рис. 4.14 Коливання температур та густини теплового потоку термомодернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої базальтовою ватою «Техноніколь» в період 15-16 січня 2019 року

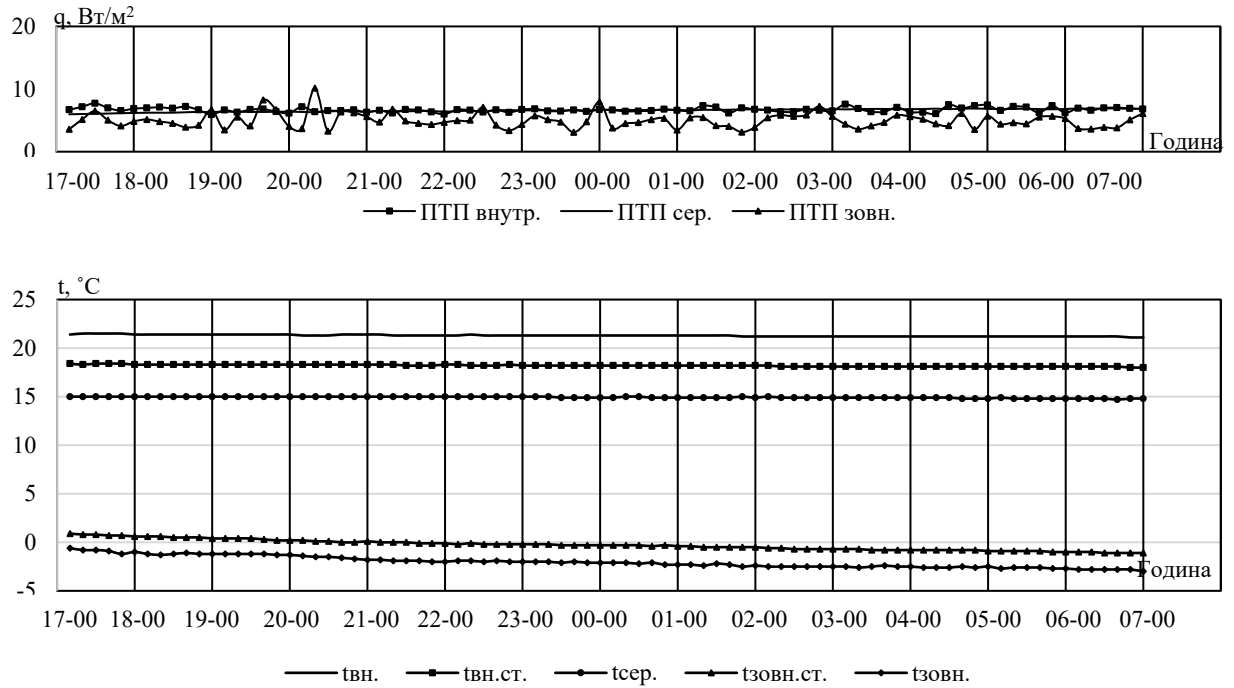


Рис. 4.15 Коливання температур та густини теплового потоку термомодернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої базальтовою ватою «Ротіс» в період 16-17 лютого 2013 року

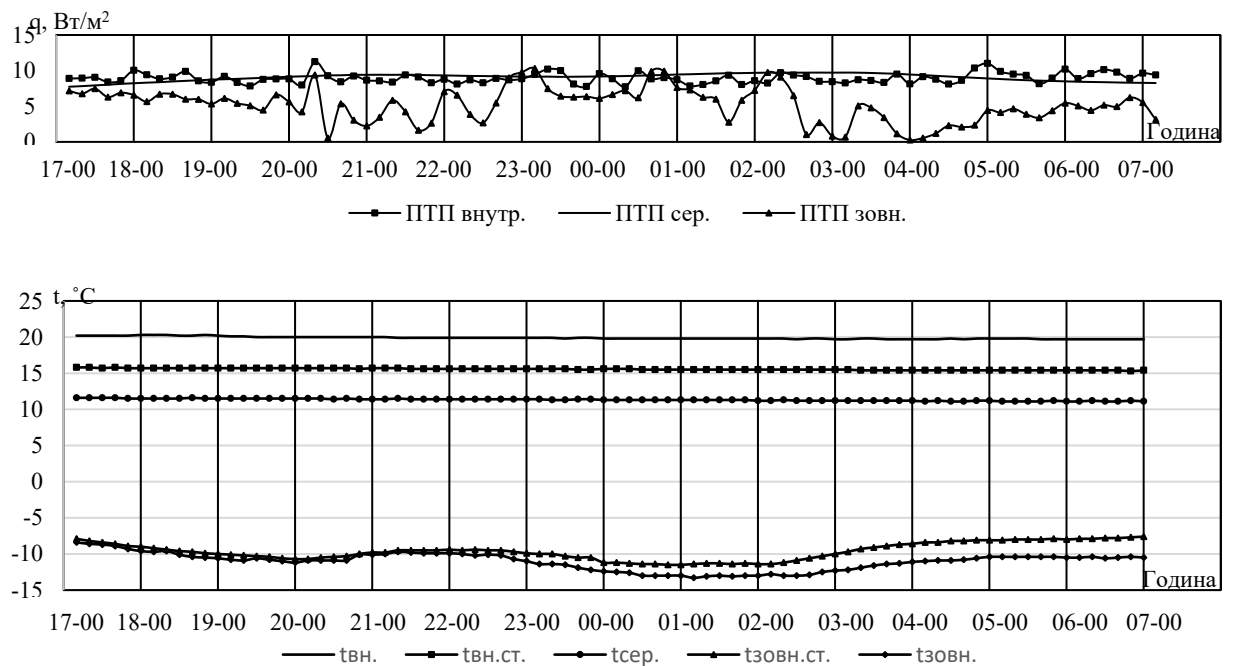


Рис. 4.16 Коливання температур та густини теплового потоку термомодернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої базальтовою ватою «Ротіс» в період 15-16 січня 2019 року

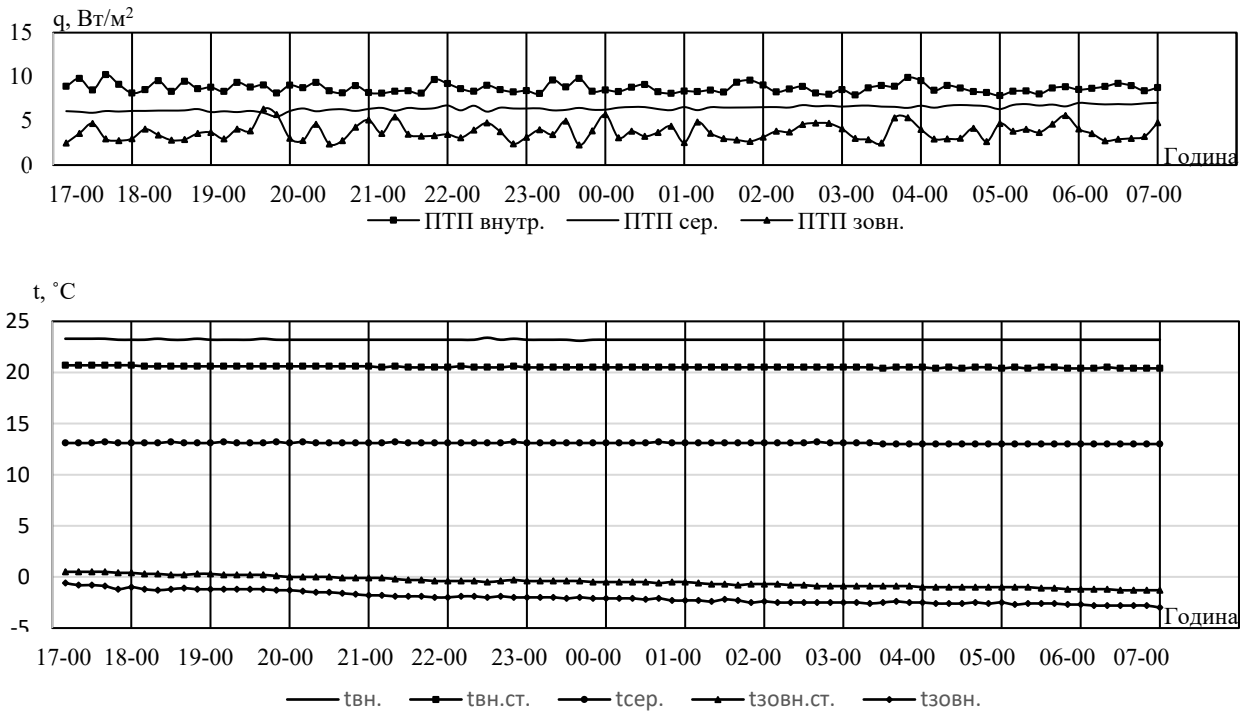


Рис. 4.17 Коливання температур та густини теплового потоку термомодернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої пінополістирольними плитами (ППС-35) в період 16-17 лютого 2013 року

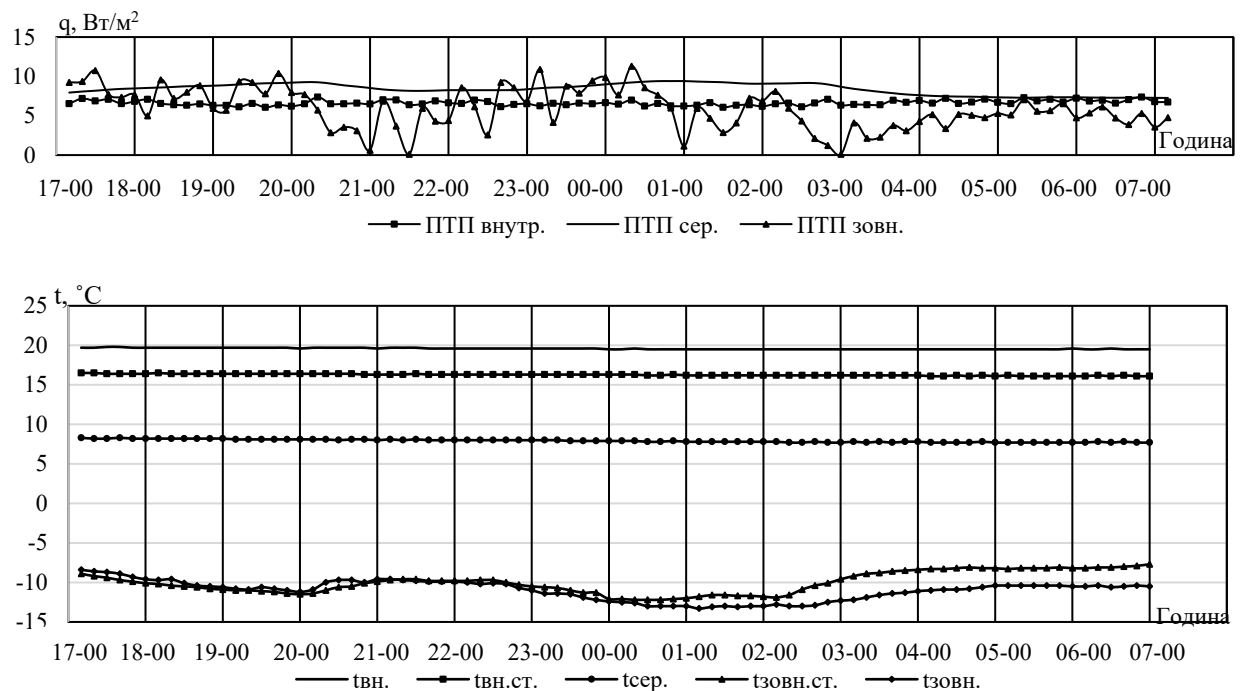


Рис.4.18 Коливання температур та густини теплового потоку термомодернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої пінополістирольними плитами (ППС-35) період 15-16 січня 2019 року

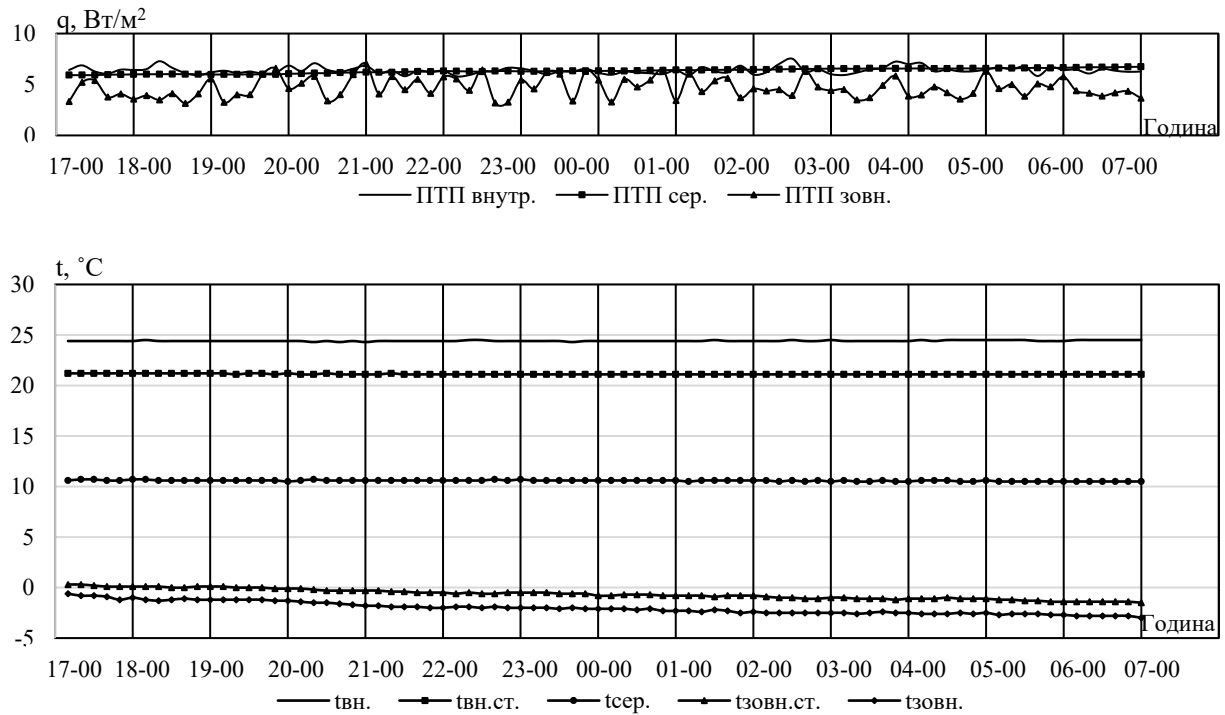


Рис. 4.19 Коливання температур та густини теплового потоку термомодернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої пінополістирольними плитами (ППС-25) в період 16-17 лютого 2013 року

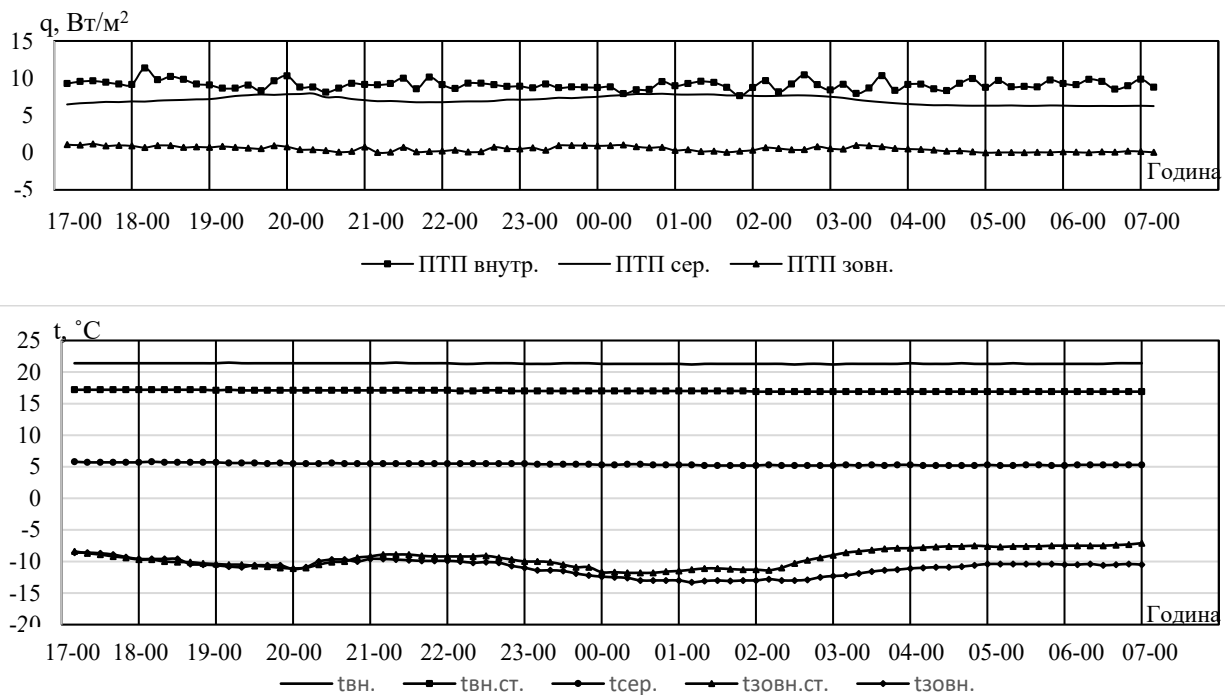


Рис. 4.20 Коливання температур та густини теплового потоку термомодернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої пінополістирольними плитами (ППС-25) в період 15-16 січня 2019 року

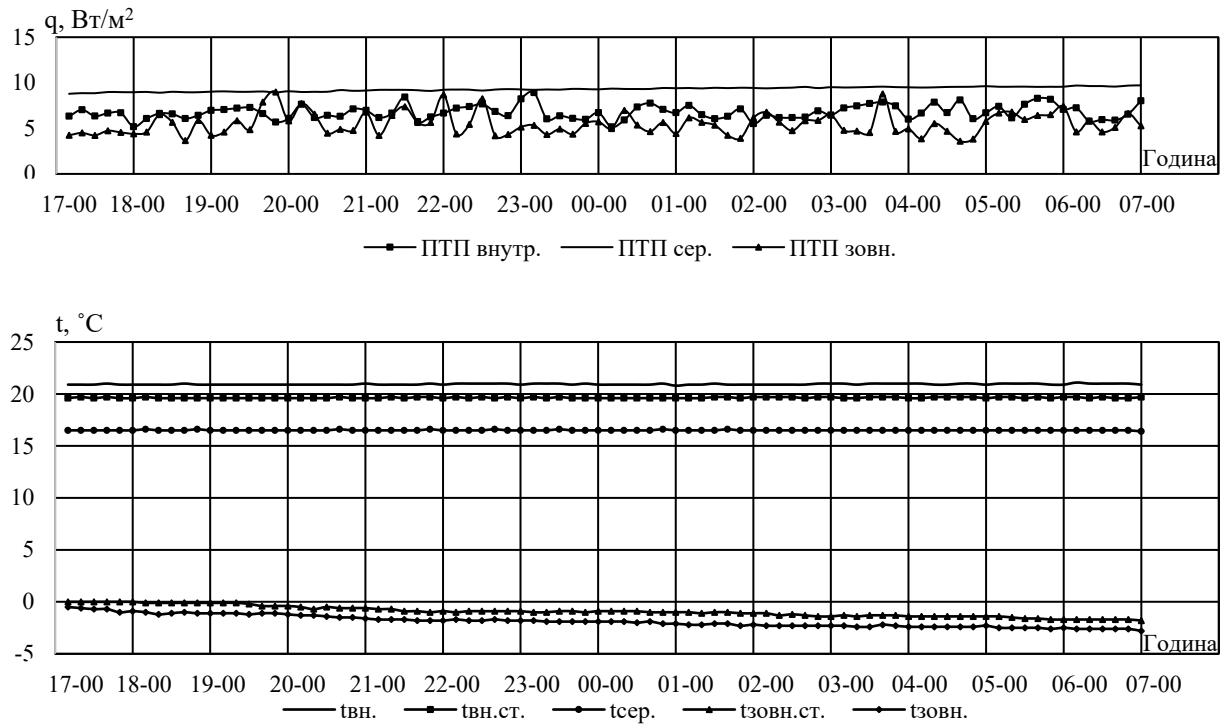


Рис. 4.21 Коливання температур та густини теплового потоку термомодернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої пінополістирольними плитами (ППС-15) в період 16-17 лютого 2013 року

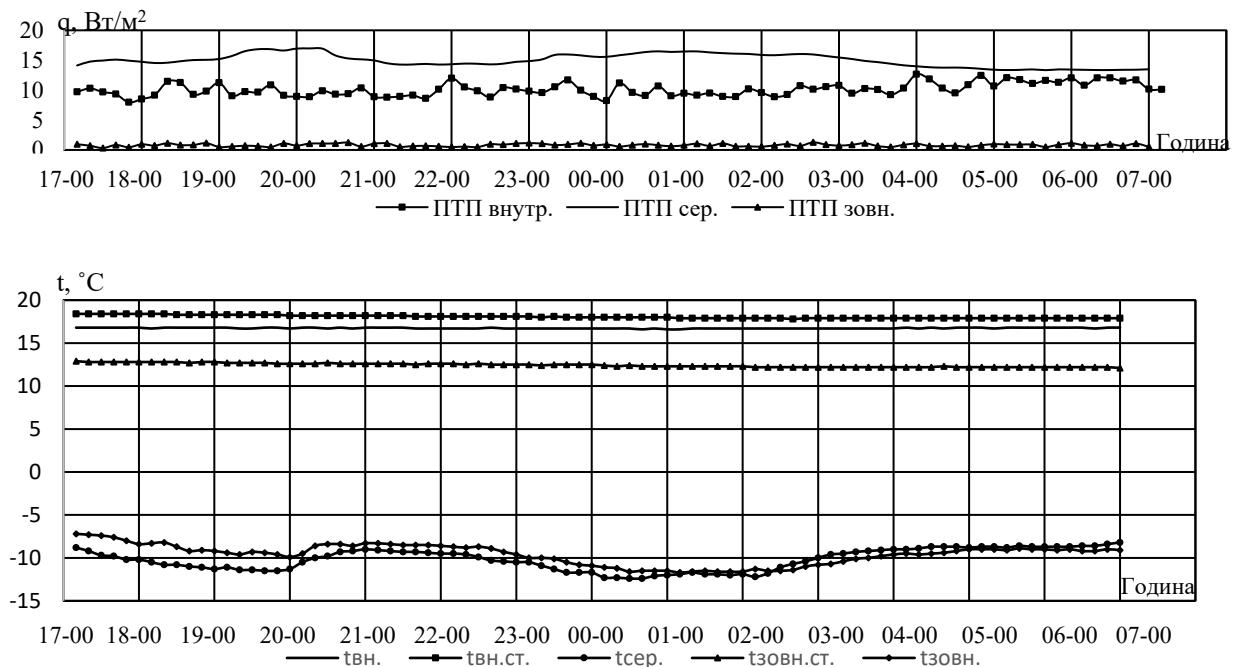


Рис 4.22 Коливання температур та густини теплового потоку термомодернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої пінополістирольними плитами (ППС-15) в період 15-16 січня 2019 року

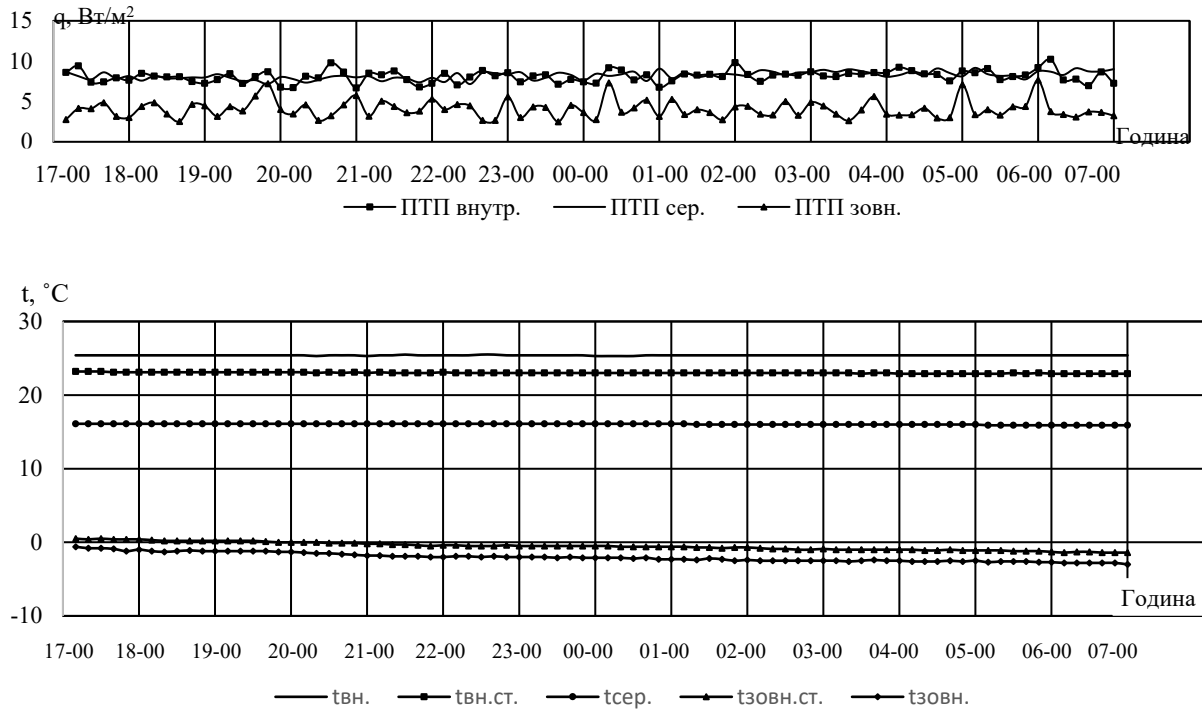


Рис. 4.23 Коливання температур та густини теплового потоку термомодернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої пінополістирольними екструзійними плитами в період 16-17 лютого 2013 року

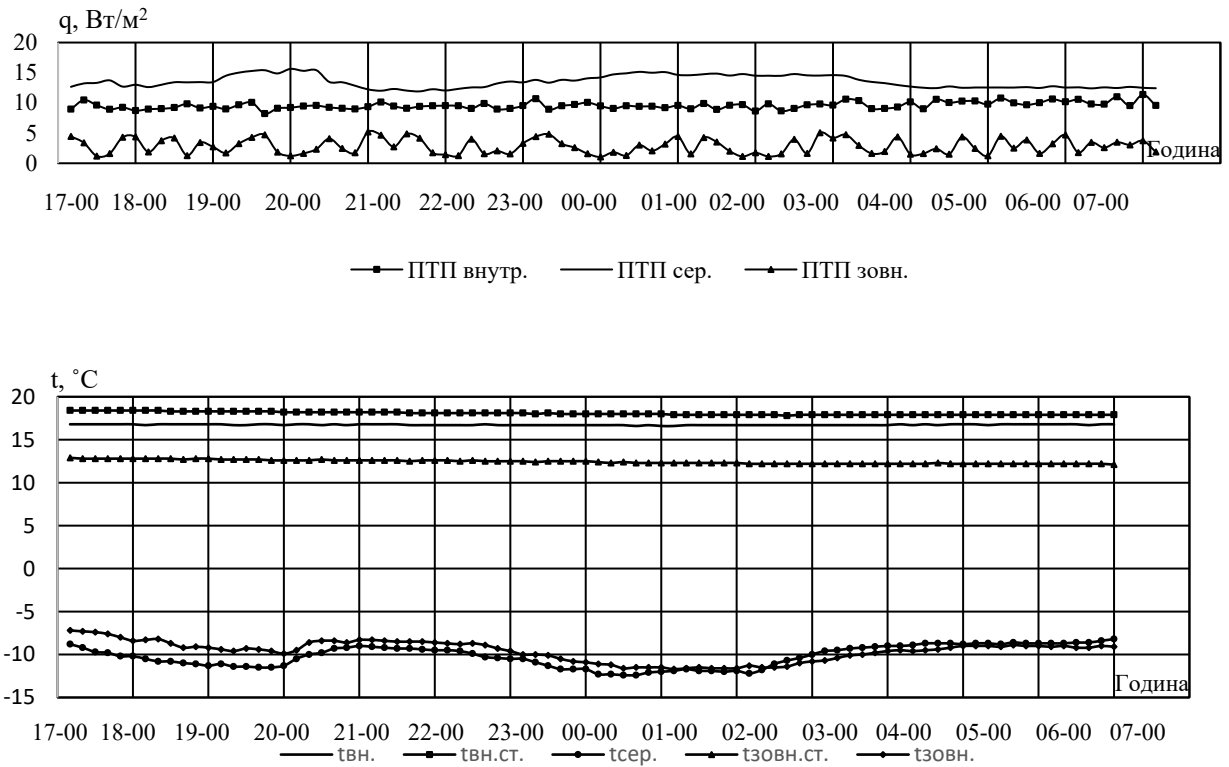


Рис. 4.24 Коливання температур та густини теплового потоку термомодернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої пінополістирольними екструзійними плитами в період 15-16 січня 2019 року

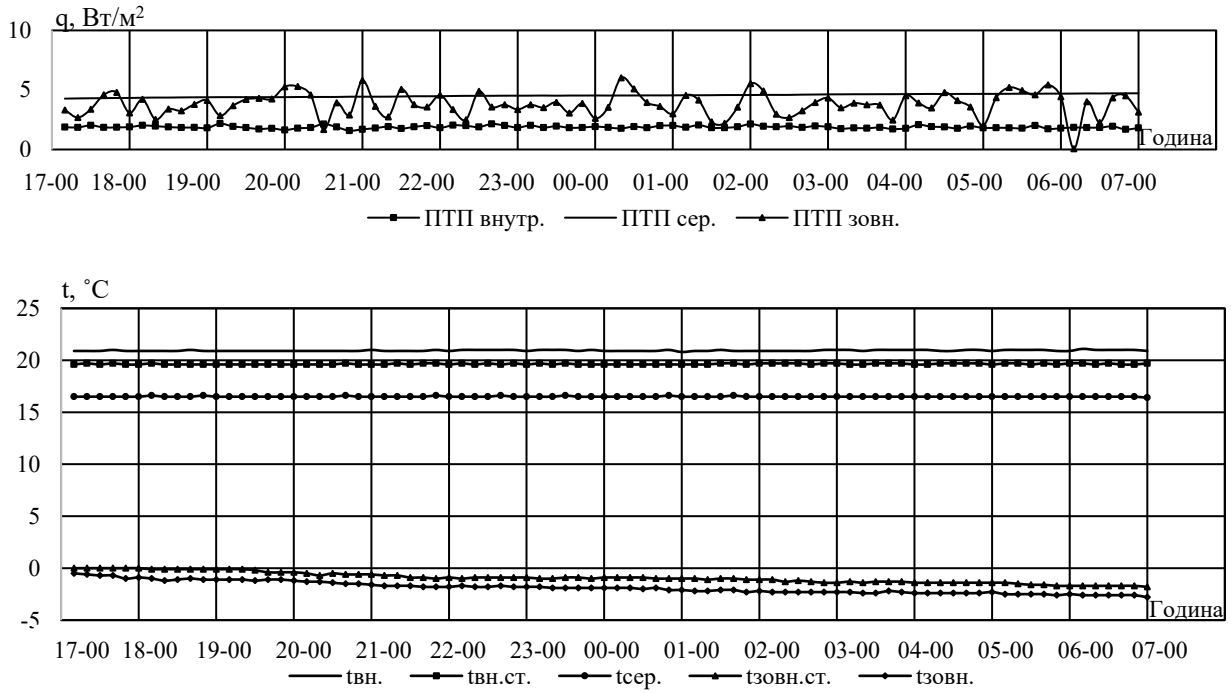


Рис. 4.25 Коливання температур та густини теплового потоку термо модернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої пінополіуретаном в період 16-17 лютого 2013 року

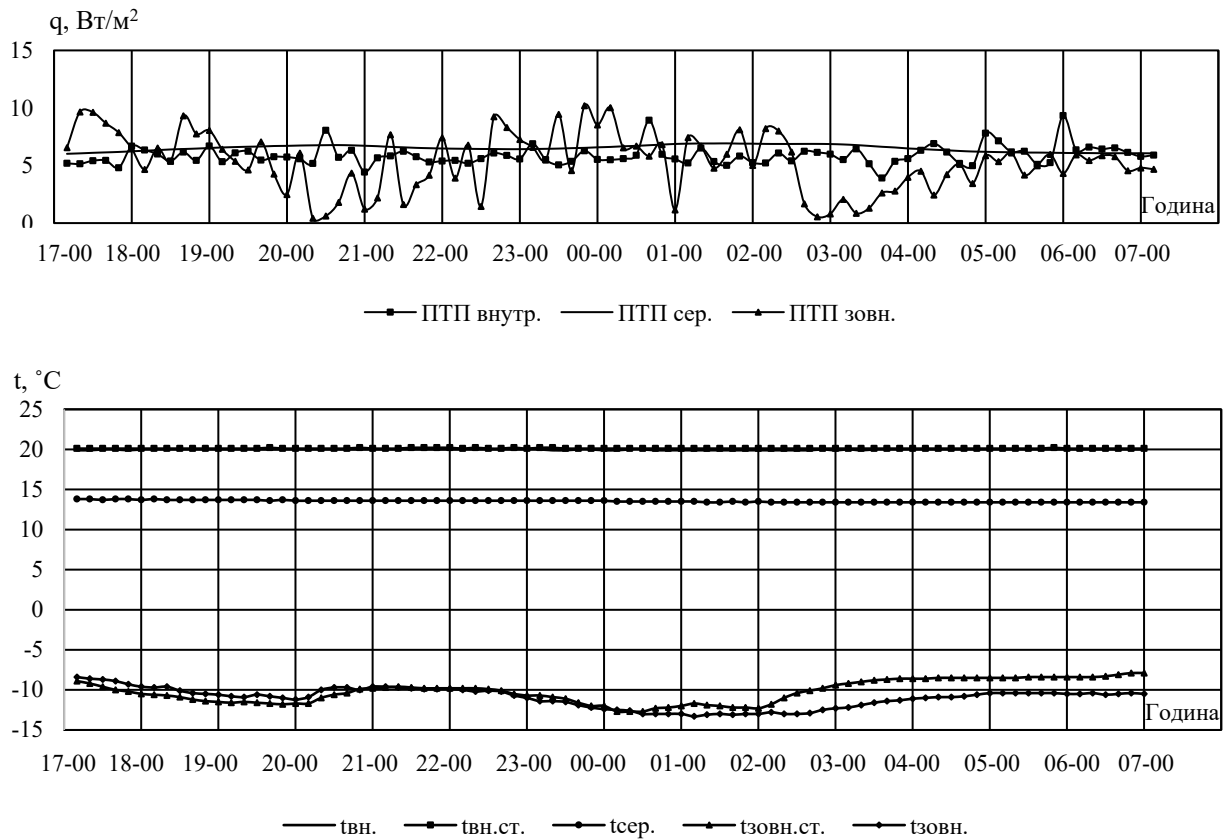


Рис. 4.26 Коливання температур та густини теплового потоку термо модернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої пінополіуретаном в період 15-16 січня 2019 року

З графіків видно, що при незначній зміні температури зовнішнього повітря, температура повітря в приміщенні ($t_{\text{вн}}$) не суттєво відрізняється від температури повітря на внутрішній стіні ($t_{\text{вн.ст.}}$). Температура внутрішньої поверхні утеплювача ($t_{\text{сер}}$) вища, ніж температура зовнішньої поверхні утеплювача ($t_{\text{зовн.ст.}}$) і змінюється в меншому інтервалі ніж температура на поверхні утеплювача. Коливання теплового потоку на внутрішній поверхні стіни всередині приміщення (ПТП_{внутр.}) і зовні фасаду в докілья (ПТП_{зовн.}), а також у зоні між несучою фасадною стіною і утеплювачем (ПТП_{сер.}) зумовлені насамперед динамікою локальної швидкості повітряного потоку і температури докілья. Під час теплових випробувань автоматично контролювались характеристики навколишнього середовища. Значення коефіцієнту теплопровідності теплоізоляційного шару визначалися за середніми значеннями всіх необхідних показників, отриманих після настання квазістаціонарного режиму, формування якого визначалось за контрольними вимірами поверхневої температури та температури внутрішнього та зовнішнього середовища.

Як видно з наведених графіків, температура повітря всередині приміщення достатньо стабільна при зміні температури зовнішнього повітря в межах $-8,4 \dots -13,3$ °С. Як видно з графіку, при однаковій температурі зовнішнього повітря ($t_{\text{зовн}}$) температури повітря в приміщеннях відрізняються. Для кабінетів та лабораторних приміщень змінюється у межах $+19,4 \dots +22,2$ °С, для соціально-побутових приміщень – $+16,0 \dots +20,4$ °С. Це пояснюється в першу чергу особливостями приміщення; відносною вологістю повітря та його швидкістю руху; кількістю теплових втрат; типу радіаторів та їх місткості.

Згідно наведено графіку, найбільша температура повітря в приміщенні прослідковується в кабінетах, де в ролі утеплювачів застосовуються пінополістирольні екструзійні плити та ППС-25. Ці матеріали характеризуються високою міцністю і жорсткістю, низьким водопоглинанням і довговічністю.

Температура повітря всередині приміщення достатньо стабільна при зміні температури зовнішнього повітря в межах $-0,2 \dots -13,9$ °С. Як видно з графіку, при однаковій температурі зовнішнього повітря температури повітря в приміщеннях

відрізняються. Для кабінетів та лабораторних приміщень змінюється у межах $+19,4...+22,2$ °С, для соціально-побутових приміщень – $+16,0...+20,4$ °С. Це пояснюється в першу чергу особливостями приміщення; відносною вологістю повітря та його швидкістю руху; кількістю теплових втрат; типу радіаторів та їх місткості. На температурний режим у приміщеннях також впливає використання будівельних матеріалів із теплоізоляційними властивостями під час проведення реконструкцій, ремонтів та проведення заходів із збереження тепла (скління та утеплення вікон, дверей, ліквідація щілин). Згідно наведено графіку, найбільша температура повітря в приміщенні прослідковується в кабінетах, де в ролі утеплювачів застосовуються пінополістирольні екструзійні плити та ППС-25. Ці матеріали характеризуються високою міцністю і жорсткістю, низьким водопоглинанням і довговічністю.

Також встановлено зменшення різниці між температурою зовнішнього повітря та температурою в зоні під утеплювачем. Це пояснюється впливом вологісного режиму теплоізоляційного матеріалу та його паропроникності. Волога потрапляє в матеріал як унаслідок дифузії водяної пари з приміщення, так і через атмосферне зволоження. Збільшення вологості призводить до зростання теплопровідності та зменшення строку експлуатації матеріалу.

На основі експериментальних даних (густина теплових потоків і температур) визначено тепловтрати через зовнішні огорожувальні конструкції для кожного варіанта утеплення, а також коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного шару та відповідний термічний опір. Порівняння отриманих результатів дозволяє експериментально обґрунтувати найбільш ефективні варіанти утеплення з теплотехнічної точки зору.

Таблиця 4.3. Аналіз теплопровідності для шарів утеплення

№ п/п	Варіант теплоізоляційного матеріалу	Теплопровідність, Вт/(м·К)				
		Виробників	Згідно ДБН В.2.6-31:2006	Розрахункове згідно ДБН В.2.6-31:2006	Розрахункове в умовах експлуатації (2013р.)	Розрахункове в умовах експлуатації (2019р.)
1	Пінополістирольні плити (ППС-15)	0,042	0,040	0,055	0,053	0,06
2	Пінополістирольні плити (ППС-25)	0,039	0,038	0,053	0,050	0,057
3	Пінополістирольні плити (ППС-35)	0,037	0,037	0,050	0,047	0,049
4	Пінополістирольні екструзійні плити	0,032	0,034	0,037	0,049	0,055
5	Напилений пінополіуретан	0,022	0,029	0,040	0,025	0,029
6	Базальтова вата «Техноніколь»	0,032	0,039	0,045	0,042	0,048
7	Базальтова вата «РОТІС»	0,040	-	-	0,047	0,049
8	Піноскло	0,053-0,054	0,045	0,054	0,073	0,070

Попередні оціночні експериментально-розрахункові значення коефіцієнтів теплопровідності теплоізоляційних шарів визначалися за середніми значеннями всіх необхідних показів, отриманих після настання квазістаціонарного режиму, формування якого визначалося за контрольними вимірами поверхневої температури внутрішнього та зовнішнього середовища. Порівняльний аналіз фактичних коефіцієнтів теплопровідності порохваних по даним 2013 і 2019 років наведено в діаграмі (Рис. 4.27).

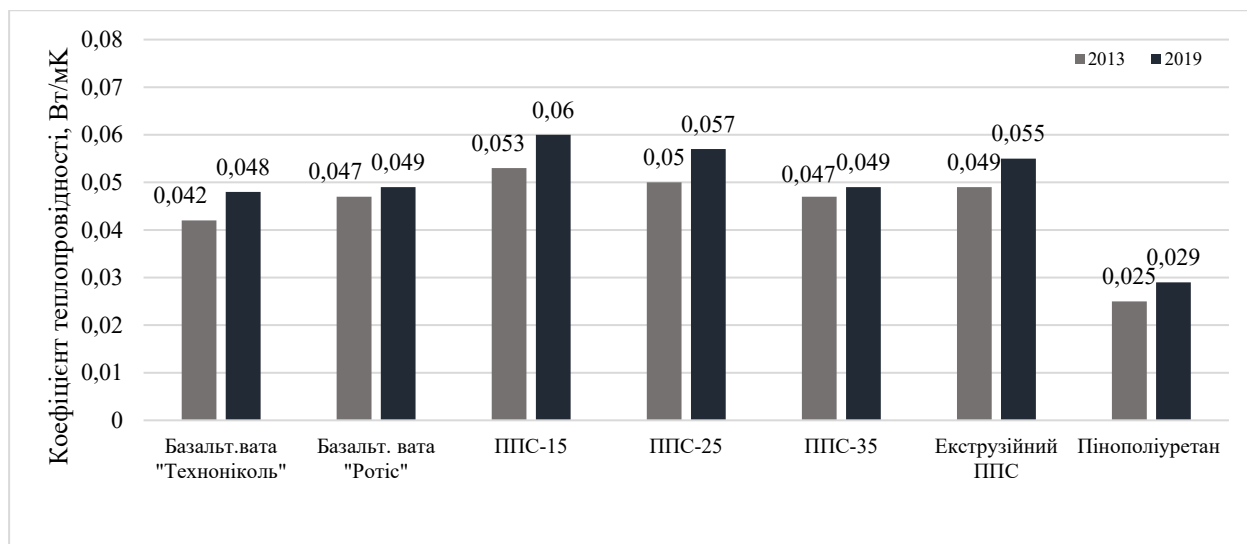


Рис. 4.27 Порівняльний аналіз фактичних коефіцієнтів теплопровідності порахованих по даним 2013 і 2019 років

Отримані результати свідчать, що в процесі експлуатації відбувається поступове зростання коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів, що необхідно враховувати під час виконання інженерних теплотехнічних розрахунків. Також проведено аналіз зміни експериментально-розрахункових значень коефіцієнта теплопровідності досліджуваних матеріалів у часі.

Як видно з рис. 4.27, для більшості пінополістирольних матеріалів (ППС-15, ППС-25 та екструдований пінополістирол) характерне поступове зростання коефіцієнта теплопровідності протягом експлуатації, що свідчить про зниження їх теплоізоляційних властивостей.

Водночас теплоізоляційні матеріали марки «Техніколь» характеризуються значно меншою зміною теплофізичних параметрів. Найбільш інтенсивне зростання коефіцієнта теплопровідності спостерігається в перші роки після проведення термореновації будівлі. Зокрема, у період з 2013 по 2019 рік коефіцієнт теплопровідності збільшився приблизно на 0,006 Вт/(м·К), що свідчить про відносну стабільність структури матеріалу та його стійкість до впливу зовнішніх факторів.

Найкращі показники теплопровідності продемонстрував пінополіуретан, для якого протягом усього періоду спостережень характерні найменші значення

коефіцієнта теплопровідності у межах 0,025–0,029 Вт/(м·К). Це дозволяє віднести його до найбільш ефективних теплоізоляційних матеріалів серед досліджуваних утеплювачів.

Отримані експериментально-розрахункові значення коефіцієнта теплопровідності досліджуваних теплоізоляційних матеріалів підтверджують гіпотезу про нелінійний характер процесів їх деструкції та поступову зміну теплофізичних властивостей у процесі експлуатації. Проведений аналіз свідчить, що старіння теплоізоляційних матеріалів відбувається нерівномірно в часі та характеризується різною інтенсивністю залежно від структури матеріалу й умов його експлуатації.

Зростання коефіцієнта теплопровідності для більшості досліджуваних матеріалів зумовлене комплексом фізичних і експлуатаційних факторів. До основних причин належать деградація внутрішньої структури матеріалу, поглинання вологи з навколишнього середовища, вплив механічних навантажень, а також дія ультрафіолетового випромінювання і температурних коливань. Зокрема, у пінополістирольних матеріалах у процесі експлуатації відбуваються мікроструктурні зміни пористої структури, що призводить до підвищення теплопровідності. Для екструдованого пінополістиролу та пінополіуретану важливим фактором є поступова дифузія та втрата газів, якими заповнені осередки матеріалу і які забезпечують його високі теплоізоляційні властивості.

Найбільш стабільними за результатами дослідження виявилися теплоізоляційні матеріали Rotys, ППС-25 та ППС-15. Це свідчить про незначні зміни їх коефіцієнта теплопровідності в процесі тривалої експлуатації, що дозволяє розглядати ці матеріали як надійні з точки зору забезпечення стабільних теплоізоляційних характеристик. Упродовж досліджуваного періоду вони демонструють мінімальне погіршення теплофізичних властивостей.

Аналіз отриманих результатів показує, що процес деградації теплофізичних характеристик є індивідуальним для різних матеріалів. Високоякісні теплоізоляційні матеріали демонструють відносно стабільні теплофізичні показники та менші зміни коефіцієнта теплопровідності протягом періоду

експлуатації. Найбільш стабільні результати серед досліджуваних матеріалів показав пінополіуретан, для якого характерні найнижчі значення коефіцієнта теплопровідності. Водночас пінополістирольні матеріали виявляють більшу схильність до погіршення теплоізоляційних властивостей, що пов'язано з особливостями їх мікроструктури та умовами експлуатації.

Таким чином, отримані результати свідчать про необхідність урахування процесів старіння теплоізоляційних матеріалів під час інженерних розрахунків енергоефективності будівель. Крім того, результати дослідження вказують на доцільність подальшого вдосконалення технологій виробництва теплоізоляційних матеріалів, підвищення їх довговічності та розроблення методів захисту від впливу зовнішніх факторів, що дозволить забезпечити стабільність теплофізичних характеристик протягом тривалого періоду експлуатації.

На основі отриманих розрахункових значення коефіцієнтів теплопровідності теплоізоляційних шарів було проведено розрахунок опору теплопередачі огорожувальної конструкції для кожного шару утеплювача.

Мінімальною вимогою енергетичної ефективності при реконструкції та капітальному ремонті огорожувальних конструкцій є виконання умови:

$$R_{\Sigma пр} \geq R_{q \min}$$

де, $R_{\Sigma пр}$ – приведений опір теплопередачі огорожувальної конструкції, $m^2 \cdot K / Bt$;

$R_{q \min}$ – мінімально допустиме значення опору теплопередачі, $m^2 \cdot K / Bt$.

Таблиця 4.4. Приведений опір теплопередачі огорожувальної для шарів утеплення

№ п/п	Варіант теплоізоляційного матеріалу	Приведений опір теплопередачі огорожувальної, ($m^2 \cdot K$)/Вт		
		Розрахунковий в умовах експлуатації (2013 рік) $R_{експл.1}$	Розрахунковий в умовах експлуатації (2019 рік) $R_{експл.1}$	Мінімально допустиме значення $R_{q \min}$
1	Пінополістирольні плити (ППС-15)	3,60	3,49	4,0
2	Пінополістирольні плити (ППС-25)	3,81	3,57	4,0

3	Пінополістирольні плити (ППС-35)	3,92	3,86	4,0
4	Пінополістирольні екструзійні плити	3,85	3,64	4,0
5	Напилений пінополіуретан	5,75	5,27	4,0
6	Базальтова вата «Техноніколь»	4,22	3,90	4,0
7	Базальтова вата «РОТІС»	4,13	3,86	4,0

З таблиці видно, що приведений опір теплопередачі для усіх наведених матеріалів за 6 років експлуатації став нижче нормативних значень, встановлених ДБН В.2.6-31.

На рис. 4.28 наведена зміна експериментальних і розрахункових значень приведенного опору теплопередачі для шарів утеплення в процесі експлуатації (в період за 2013 та 2019 роки) та порівняння їх з установленим нормативним значенням.

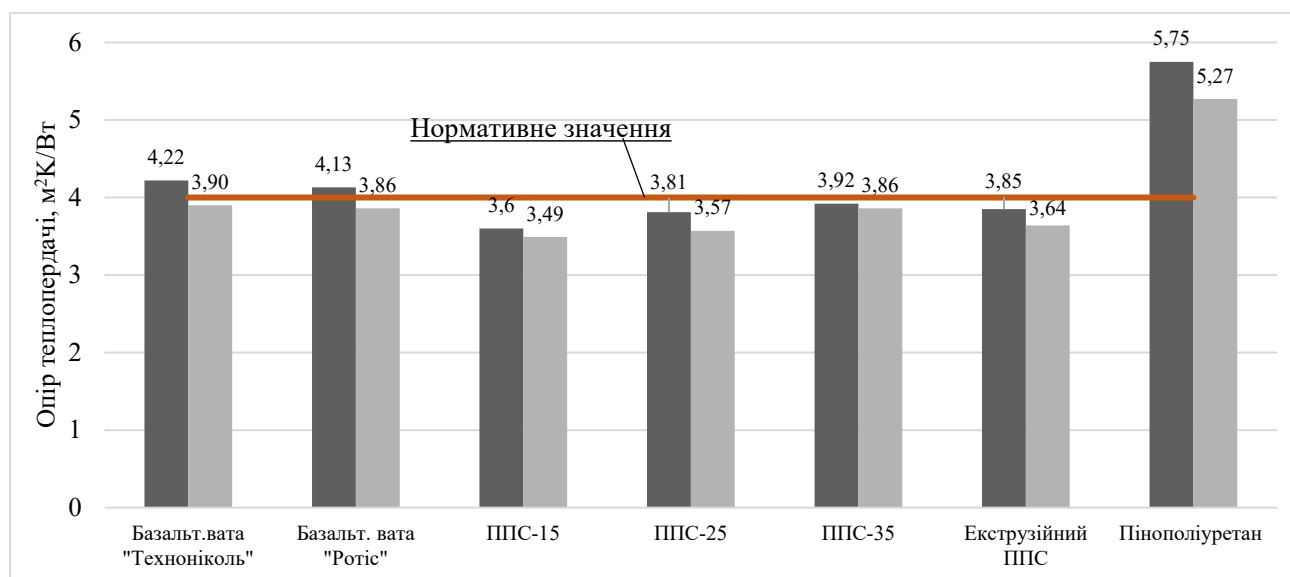


Рис. 4.28

Зміна експериментальних і розрахункових значень приведенного опору теплопередачі для теплоізоляційних матеріалів в процесі експлуатації

Аналіз отриманих результатів показує, що лише окремі теплоізоляційні матеріали забезпечують термічний опір огорожувальної конструкції, який

відповідає або перевищує нормативне значення $4 \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$. Інші матеріали демонструють недостатній рівень теплозахисту для обраної стінової огороджувальної конструкції як об'єкта дослідження, що свідчить про необхідність або збільшення товщини теплоізоляційного шару, або застосування більш ефективних теплоізоляційних матеріалів.

Варіант конструкції без використання теплоізоляції забезпечує менш ніж половину нормативного значення опору теплопередачі, що підтверджує вирішальну роль теплоізоляції у забезпеченні енергоефективності будівель відповідно до чинних нормативних вимог. Таким чином, для досягнення сучасних стандартів теплозахисту необхідним є оптимізація конструктивних рішень огороджувальних конструкцій.

4.4. Порівняльний аналіз експериментальних та розрахункових результатів по визначенню вологості стінової конструкції

За одновимірною моделлю тепломасоперенесення з застосуванням умов спряження визначаються розрахунковим шляхом розподіли температури та відносної вологості повітря в шарах будівельної конструкції, що досліджується. За значеннями відносної концентрації водяної пари в повітрі визначається також відносна вологість повітря в матеріалі утеплювача.

Для розрахунків, наступні значення коефіцієнтів паропроникності шарів будівельної конструкції:

- для бетону: $m_b=0,03 \text{ мг}/(\text{м год Па})$;
- для мінеральної вати $m_{вт}=0,4 \text{ мг}/(\text{м год Па})$;
- для матеріалу утеплювача (базальтова вата): $m_y=0,53 \text{ мг}/(\text{м год Па})$.

Коефіцієнти масовіддачі β_b ; β_z на внутрішній та на зовнішній поверхнях багатошарової стіни розраховуються за аналогією між тепловіддачею та масовіддачею.

Результати порівняння розрахункових залежностей від часу відносної вологості повітря всередині утеплювача з базальтової вати з результатами експериментального визначення цих залежностей наведено на рис. 4.29.

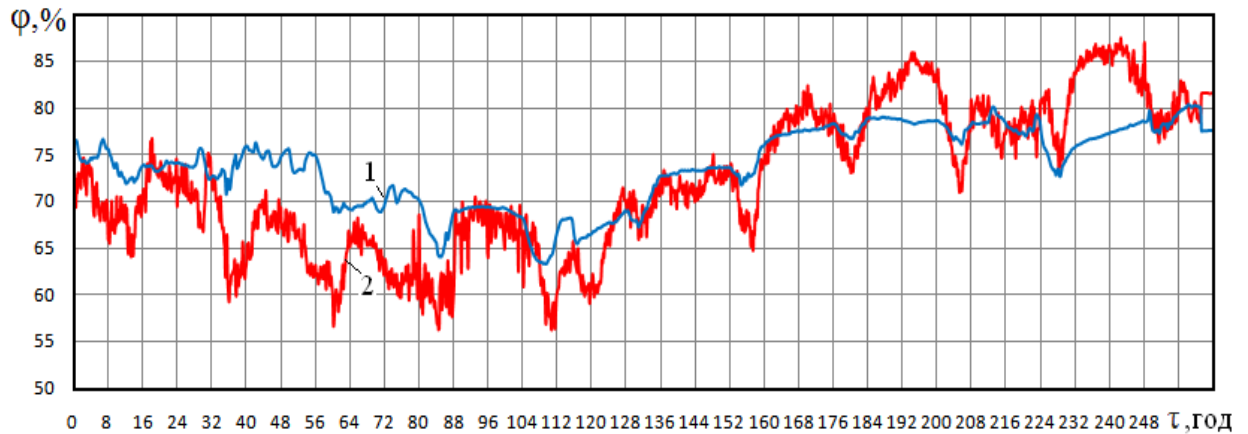


Рис. 4.29 Залежність від часу відносної вологості повітря в утеплювачі з базальтової вати: 1 –результати експерименту; 2 – результати розрахунку

Як видно з цього рисунку, результати експериментальних та розрахункових досліджень якісно подібні. Чисельні значення відносної вологості повітря, що знайдені з розрахунків, також у цілому відповідають величинам, що одержані з експерименту.

Експериментальні дослідження виконувалися також для подібної стінової конструкції, утеплювачем якої був пінополістирол ППС-25, для якого $m_y=0,05$ мг/(м·год·Па). Порівняння результатів експериментального визначення відносної вологості повітря всередині утеплювача ППС-25 з розрахунковими результатами наведено на рис. 4.30.

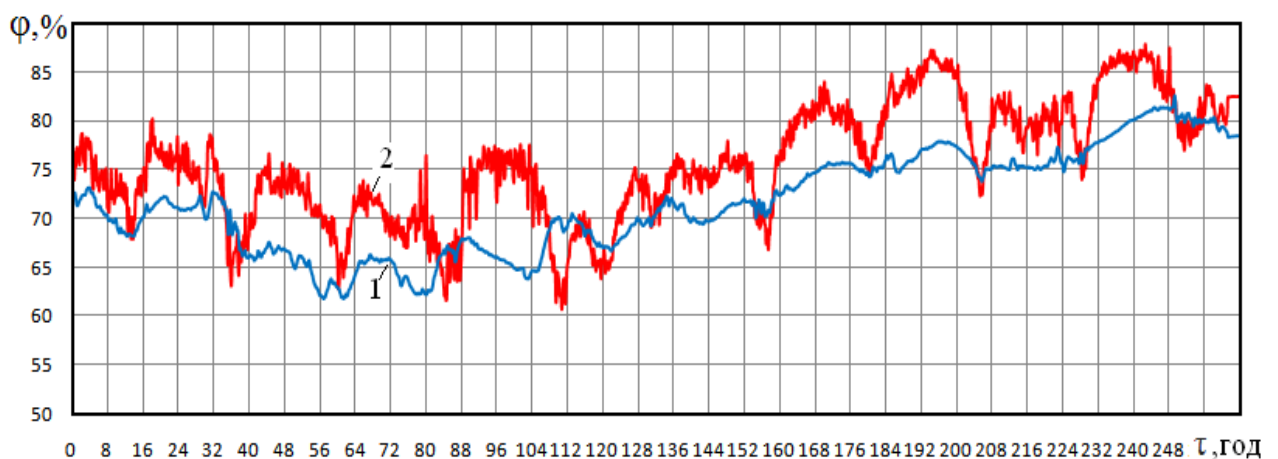


Рис. 4.30 Залежність від часу відносної вологості повітря в утеплювачі ППС-25: 1 –результати експерименту; 2 – результати розрахунку

Як видно з рис.4.30, експериментально визначені величини відносної вологості повітря всередині ППС-25 (крива 1) виявилися нижчими, ніж аналогічні значення, що одержані за розрахунковою моделлю (крива 2).

З наведених результатів експериментальних досліджень випливає, що додатковий шар теплоізоляції на зовнішній поверхні несучої стінової конструкції сприяє підвищенню температури цієї поверхні, а також зменшенню діапазону її коливань за умов значних змін температури зовнішнього середовища.

Встановлено, що відносна вологість зовнішнього повітря є суттєво вищою, ніж у приміщенні. Водночас парціальний тиск (або абсолютний вміст) водяної пари у внутрішньому повітрі є більшим, ніж у зовнішньому. Унаслідок цього в зимовий період водяна пара дифундує через стінову конструкцію з приміщення назовні.

З метою мінімізації впливу сонячної радіації на температурний режим приміщень, а також виключення впливу даху без горищного простору та підлоги без підвального приміщення, заходи з термореновації проводилися на північному фасаді другого поверху досліджуваної будівлі.

Висновки до розділу

1. У розділі виконано дослідження зміни теплофізичних характеристик теплоізоляційних матеріалів у процесі експлуатації та проаналізовано їх вплив на теплозахисні властивості стінових огорожувальних конструкцій будівель.
2. Проведено аналіз експериментально-розрахункових значень коефіцієнта теплопровідності досліджуваних теплоізоляційних матеріалів у різні періоди експлуатації. Встановлено, що для більшості матеріалів спостерігається поступове зростання коефіцієнта теплопровідності, що свідчить про процес їх природного старіння.
3. Підтверджено, що зміна теплофізичних характеристик теплоізоляційних матеріалів має нелінійний характер і залежить від ряду експлуатаційних факторів, зокрема впливу вологи, механічних навантажень, температурних коливань, ультрафіолетового випромінювання та поступових структурних змін пористої структури матеріалів.

4. Проведений аналіз коефіцієнтів старіння показав, що найбільш стабільними за експлуатаційними характеристиками є теплоізоляційні матеріали Rotys, ППС-25 та ППС-15, для яких зміни коефіцієнта теплопровідності з часом є мінімальними. Встановлено, що піноскло та пінополіуретан також характеризуються достатньо високою ефективністю теплоізоляції, проте для них спостерігається дещо більша зміна коефіцієнта теплопровідності в процесі експлуатації, що може бути пов'язано зі структурними змінами матеріалу або дифузією газів у його пористій структурі. Найменшу стабільність теплоізоляційних властивостей продемонстрували екструдований пінополістирол та теплоізоляційні матеріали «Техноніколь», для яких спостерігається найбільш інтенсивне зростання коефіцієнта теплопровідності з часом.
5. На основі отриманих експериментально-розрахункових значень коефіцієнта теплопровідності виконано розрахунок опору теплопередачі утеплених стінових огорожувальних конструкцій з використанням досліджуваних теплоізоляційних матеріалів. Встановлено, що лише окремі теплоізоляційні матеріали забезпечують значення термічного опору огорожувальної конструкції, яке відповідає або перевищує нормативний рівень $4 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.
6. Показано, що використання огорожувальної конструкції без теплоізоляційного шару не забезпечує навіть половини нормативного значення опору теплопередачі, що підтверджує критичну роль теплоізоляції у забезпеченні енергоефективності будівель.
7. Отримані результати свідчать про необхідність оптимізації конструктивних рішень огорожувальних конструкцій, зокрема шляхом вибору ефективних теплоізоляційних матеріалів та раціонального визначення товщини теплоізоляційного шару.

5. ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ УМОВ НА ТЕРИТОРІЇ ЗАБУДОВИ

5.1. Вплив архітектурних характеристик будівель на інтенсивність теплових втрат їхніх фасадів

Архітектурні особливості будівель суттєво впливають на рівень теплових втрат їхніх фасадів. Геометрія споруди, орієнтація фасадів відносно сторін світу та напрямків вітру, конфігурація огорожувальних конструкцій, а також наявність виступів, балконів чи інших елементів визначають інтенсивність теплообміну між внутрішнім середовищем і зовнішнім простором. Щільність забудови та взаємне розташування будівель змінюють аеродинамічний режим навколишнього середовища, що безпосередньо впливає на умови тепловіддачі. Текстура поверхні, її розміри та співвідношення сторін формують характер теплових потоків і можуть спричиняти локальні зони підвищених втрат. Вибір матеріалів та конструктивних систем у процесі проектування створює умови як для зменшення, так і для посилення теплових втрат.

Вирішення завдань аеродинаміки будівель має важливе, а іноді й визначальне значення для проектування та розрахунку повітряних потоків усередині споруди, оцінки її впливу на прилеглу територію та вибору огорожувальних конструкцій із необхідними показниками повітропроникності й обтікання. Усередині будівель можуть виникати значні повітряні потоки, що потребує спеціальних інженерних рішень: шлюзування вхідних дверей і сходових секцій, герметизації сміттєпроводів тощо. Додаткові аспекти аеродинаміки споруд охоплюють питання розсіювання шкідливих речовин, організації пішохідних зон, утворення снігових заносів та інших явищ.

Розвиток висотного будівництва та потреби вітрової енергетики зумовили появу нових інженерних задач, які не охоплюються чинними нормами та правилами, особливо у випадках зведення нових споруд у межах існуючої забудови. У таких умовах визначення вітрових навантажень, енергетичних характеристик вітру та інших параметрів, пов'язаних з обтіканням

огороджувальних конструкцій, необхідно здійснювати з урахуванням взаємного впливу нової та наявної забудови.

Коефіцієнти тепловіддачі на зовнішніх фасадах будівель визначаються комплексом чинників, серед яких швидкість і напрям вітру, орієнтація та нахил поверхні, тип місцевості, вплив сусідніх споруд, текстура та розміри фасаду, різниця температур між повітрям і поверхнею, а також співвідношення сторін.

Кількісно теплові втрати через фасад можна описати рівнянням теплопередачі:

$$Q = \alpha \cdot A \cdot \Delta T, \quad (5.1)$$

де Q – тепловий потік, α – коефіцієнт тепловіддачі, A – площа фасаду, ΔT – різниця температур між повітрям і поверхнею.

Для практичних розрахунків у будівельній аеродинаміці застосовуються емпіричні залежності. Найбільш поширеними є формули Юргерса та Мак-Адамса, які враховують швидкість вітру:

Формула Юргерса:

$$\alpha = 5.7 + 3.8 \cdot v \quad (5.1)$$

Формула Мак-Адамса:

$$\alpha = 5.8 + 3.9 \cdot v \quad (5.2)$$

де v – швидкість вітру (м/с), α – коефіцієнт тепловіддачі.

Ці залежності широко застосовуються для оцінки теплових втрат фасадів у різних умовах обтікання повітряним потоком. Вони дозволяють швидко отримати наближені значення α , що є особливо важливим при розрахунках енергоефективності споруд. Важливим є те, що ламінарний режим обтікання фасадів зустрічається рідко, переважно при невеликих швидкостях вітру та гладких поверхнях. У реальних умовах міської забудови більш характерним є турбулентний режим, який забезпечує інтенсивніший теплообмін. Саме тому формула Мак-Адамса має ширше практичне застосування при розрахунках теплових втрат будівель.

Таким чином, використання формул Юргерса та Мак-Адамса у поєднанні з рівняннями теплообміну дозволяє отримати комплексну оцінку коефіцієнтів

тепловіддачі, що є необхідним для оптимізації енергоефективності будівель та розробки практичних рекомендацій щодо зниження теплових втрат їхніх фасадів.

Значення густини теплового потоку всередині приміщення та ззовні відрізняється тим, що ззовні є коливання і стрибки внаслідок впливу погодних факторів. В ті дні, коли були опади і коли були пориви вітру, це відразу відображалось на експериментальних даних – були стрибки в декілька десятків $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$. Вплив розсіяної сонячної радіації чітко відслідковується в денні години. Щодо від'ємних значень густини теплового потоку, то вони пояснюються оберненням теплового потоку, яке спостерігалось всередині дня, а це призводить до інверсії температур скляних поверхонь.

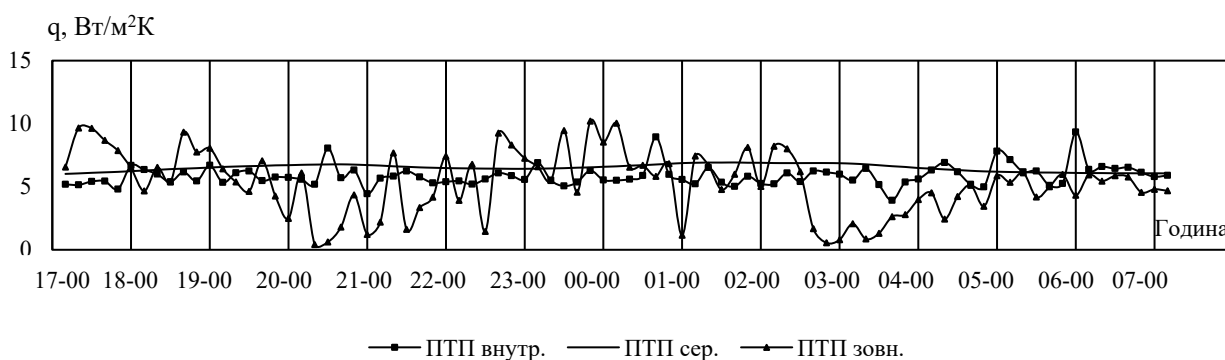


Рис. 5.1. Значення густини теплового потоку термомодернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої пінополіуретаном в період 15-16 січня 2019 року

На рис. 5.1 є суттєві коливання теплового потоку, особливо зовнішнього, що зумовлені пульсаціями швидкості вітрового потоку. Їх характер ілюструє рис. 5.2, на якому наведені експериментальні дані локальної швидкості повітря на зовнішній поверхні фасадної стіни, отримані кожну секунду за допомогою термоанемометра Testo 405, встановленого своїм сенсором врівень з площиною поверхні фасаду (рис. 5.3). При середній швидкості вітрового потоку в 3,0 м/с значення її пульсацій досягало до 1,5 м/с, що відповідно до формули В.М. Богословського призводило до зміни коефіцієнту тепловіддачі майже на порядок. Зазначимо, що відповідні експериментальні пульсації температури мали менший масштаб і сягали до 0,4 °С.

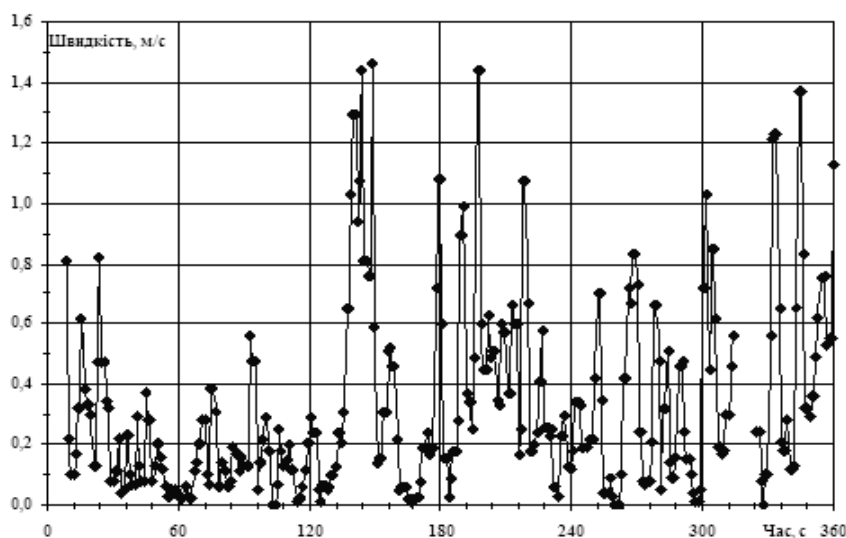


Рис. 5.2 Значення швидкості повітря на зовнішній поверхні фасадної стіни адміністративного корпусу №1



Рис. 5.3 Зовнішній вигляд термоанемометра Testo 405

Відомо, що коефіцієнт тепловіддачі з зовнішньої поверхні огорожень залежить від швидкості вітрового потоку. Використовуючи отримані дані можна визначити коефіцієнт тепловіддачі за допомогою формули В.М. Богословського [31], а саме для вертикальної поверхні (так як датчики були встановлені таким чином):

$$\alpha_{з.верт.} = 5.8 + 11.6\sqrt{v}, \quad (5.4)$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/($m^2 \cdot K$), v - швидкість вітру, м/с. В залежності від пульсацій швидкості вітру, а було використано значення – 0,2; 0,5; 1; 1,5 м/с - визначили величину коефіцієнту тепловіддачі, який становить відповідно – 10,9; 14; 17,4; 19,96 Вт/($m^2 \cdot K$). Максимальне значення пульсацій швидкості досягали 2,5

м/с, при якому значення коефіцієнту теплообміну становило 24,1 Вт/(м²·К). При середньому значенні швидкості вітру $v=0,32$ м/с, значення коефіцієнту тепловіддачі становить $\alpha_{cp}=12,4$ Вт/(м²·К). Зважаючи на це, а також з аналізу даних на рис. 5.2, було зроблено висновок, що пульсації густини теплового потоку, які відображено на графіках залежності густини теплового потоку, зокрема на рис. 5.1, також пов'язані зі зміною швидкості вітру і відповідно зі зміною розрахункових значень коефіцієнту тепловіддачі, а також з тим, що стіни містять вологу (тому значення термічного опору дещо знижується). Внаслідок проведеного аналізу встановлено, що пульсації теплового потоку відповідають пульсаціям швидкості потоку вітру біля поверхні стіни.

В табл. 5.1 представлена зміна значень значення коефіцієнту теплообміну в залежності від швидкості вітру. Де, $\alpha_{з.верт}$ розраховано по формулі 5.4, а $\alpha_{з.гор}$ – отримано по формулі 5.5 за [31], а $\alpha_{з.пл}$ – визначено по формулі 5.6 [32].

$$\alpha_{з.гор} = 8,7 + 2,5v, \quad (5.5)$$

$$\alpha_{з.пл} = 1,163 \cdot (6,35v^{0,656} + 3,25e^{-1,91v}). \quad (5.6)$$

Таблиця 5.1 Закономірність зміни коефіцієнтів тепловіддачі в залежності від швидкості та напрямку вітру

V , м/с	$\alpha_{з.верт.}$	$\alpha_{з.гор.}$	$\alpha_{з.пл}$
0	5,8	8,7	1,16
1	17,4	11,2	7,94
1.5	19,96	12,45	9,84
2,5	24,1	14,95	12,05

Критеріями вимірювання вітрового потоку є швидкість та напрямок. В табл. 5.1 $\alpha_{з.гор}$ показано зміну коефіцієнту тепловіддачі в залежності від цього напрямку. Там представлено вплив пульсацій швидкості вітру на пульсації теплового потоку, які спостерігаються на графіках.

5.2 Чисельне моделювання вітрових потоків в зоні міської забудови

Область обчислювальної вітрової інженерії (Computational Wind Engineering), що охоплює оцінку навантажень на конструкції, моделювання граничних умов для розрахунку мікроклімату приміщень, визначення теплових втрат будівель та вентиляцію міського простору, стрімко розвивається і поступово замінює традиційні методики ДСТУ та експериментальне моделювання в аеродинамічних трубах.

Нині регламентовані та загальноприйняті методики оцінки вітрових навантажень на будівлі не враховують багатьох факторів, що визначають реальні умови їх експлуатації. Зокрема, ці методики не здатні врахувати складну геометричну форму сучасних споруд, а також взаємний вплив компактно розташованих будівель. Розроблені алгоритми розрахунку базуються переважно на досвіді проектування будівель малої та середньої поверховості простої форми.

Існує низка суттєвих обмежень під час моделювання обтікання будівель і споруд повітряними потоками в аеродинамічних установках. Передусім це значні фінансові витрати на проведення експериментів, а також обмежена кількість установок із довжиною робочої зони близько 100 м, які забезпечують формування достатньо потужного прикордонного шару. Крім того, важливою проблемою є неможливість відтворення у вертикальному напрямку робочої зони аеродинамічних труб логарифмічного або степеневого профілю швидкості.

Розвиток обчислювальної техніки на сучасному етапі вже дозволяє створювати точні моделі обтікання повітряним потоком не лише окремих будівель складної конфігурації, а й оцінювати вплив навколишніх споруд. Йдеться про використання в архітектурному плануванні та будівельних розрахунках широко відомих CFD-пакетів, таких як ANSYS Fluent та Star CCM, призначених для вирішення широкого кола задач аеродинаміки й тепломасопереносу шляхом чисельного розв'язання систем рівнянь Нав'є-Стокса.

У роботі [73] наведено результати виконання проекту, пов'язаного з аналізом вітрових умов на пішохідному рівні з використанням засобів обчислювальної гідродинаміки (CFD-моделювання в пакеті Star CCM). Було побудовано

тривимірну модель обтікання висотної будівлі в оточенні малоповерхової забудови та розроблено оперативну процедуру оцінки вітрових умов на пішохідному рівні, що поєднує статистичні дані про силу й напрям вітру, критерії вітрової комфортності та CFD-моделювання. У результаті отримано поля швидкостей і тисків та сформульовано рекомендації для архітектурного планування району. В роботі [74] детально описується чисельне моделювання атмосферного пограничного шару (АПШ) і наведено результати для потреб вітрової енергетики.

У даному дослідженні в тривимірній постановці виконано моделювання обтікання повітряним потоком комплексу поруч розташованих будинків. Основними завданнями моделювання є визначення полів швидкості вітрового потоку з метою вибору місця для будівництва вітрових енергетичних установок, а також визначення зовнішніх граничних умов на огорожувальних поверхнях будинків для подальшого їх використання в розрахунках внутрішніх систем їх опалення та вентиляції.

Моделювання здійснювалося для великої області атмосферного прикордонного шару, висота якого може сягати кількох сотень метрів залежно від висоти найбільшої будівлі. Приймалося, що повітря є нестисливим середовищем (з огляду на невеликі швидкості руху), потік повністю турбулентний, а вплив сил Коріоліса незначний порівняно з силами тертя об підстилаючу поверхню. У більшості моделей [75, 76] рух повітря в АПШ розглядався за умови нейтральної стратифікації, без урахування теплообміну між повітрям і земною поверхнею.

5.2.1 Атмосферний пограничний шар

Рух повітряних мас в атмосфері відбувається під впливом сил горизонтального баричного градієнта $(1/\rho)(\partial p/\partial n)$, сили Коріоліса $F_c = mfv$, відцентрової сили $F_{cen} = U^2/r$ і сили тертя повітря об підстилаючу поверхню Землі $\tau_u = \rho K(x, y, z) \partial u/\partial z$; $\tau_v = \rho K(x, y, z) \partial v/\partial z$. У співвідношеннях, наведених вище m - маса, f -параметр Коріоліса; v, u - складові швидкості, відповідно за координатами x і y ; ρ -щільність; p -тиск; n -нормаль до деякого контуру постійного

горизонтального тиску; $K(x, y, z)$ -коефіцієнт турбулентної в'язкості; r -радіус кривизни траєкторії руху повітря.

Поблизу поверхні Землі сила тертя повітря об підстилаючу поверхню гальмує його рух, і внаслідок турбулентного перемішування ефект гальмування поширюється по вертикалі на певну область, що називається атмосферним пограничним шаром (АПШ). Товщина АПШ при нейтральній стратифікації атмосфери залежить від швидкості вітру, шорсткості підстильної поверхні та широти. У середині цього шару швидкість вітру зростає з висотою і на його верхній межі, де вплив тертя можна знехтувати, досягає значення градієнтної швидкості.

Атмосферний пограничний шар (АПШ), також відомий як планетарний пограничний шар (ППШ), є нижньою частиною тропосфери, а процеси, що відбуваються в ньому, безпосередньо залежать від взаємодії повітря з земною поверхнею. Як правило, АПШ по вертикалі поділяється на три частини [40, 46], що показано на рис. 5.4.

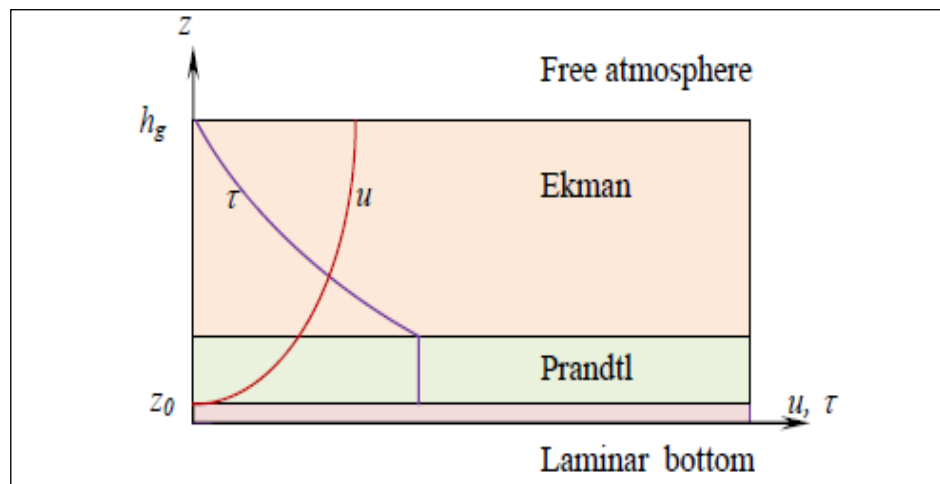


Рис.5.4 Атмосферний пограничний шар

Сама нижня частина відома як ламінарний підшар з товщиною z_0 , що дорівнює довжині аеродинамічній шорсткості підстильної поверхні. Він настільки малий, що в більшості випадків їм можна знехтувати, тоді $z \approx z + z_0$. Практично неможливо перевірити наявність цього шару через його невеликий вертикальний розмір. У ламінарному підшарі всі фізичні процеси, такі як процеси перенесення імпульсу і теплоти регулюється на рівні молекулярного руху. У більшості моделей

прикордонного шару існування цього шару явно не враховується. Зрозуміло, що також існує деякий перехідний шар між ламінарним підшаром і так званим шаром Прандтля, де турбулентність повністю розвинена.

Над ламінарним підшаром у вітровому потоці атмосферного прикордонного шару (АПС) розташований шар Прандтля (рис. 5.5), або приземний шар, який характеризується повністю розвинутою турбулентністю, логарифмічним профілем швидкості та сталою напругою тертя, що дорівнює напрузі тертя на поверхні Землі. Висота шару Прандтля може коливатися від 20 до 100 м і більше залежно від теплової стратифікації повітря та шорсткості підстильної поверхні.

Швидкість вітру в шарі Прандтля істотно зростає зі збільшенням висоти, досягаючи значень понад половину швидкості вітру на верхній межі атмосферного прикордонного шару. Вплив сили Коріоліса в межах шару Прандтля можна знехтувати через його відносно малу товщину, тому поворот вектора швидкості вітру в цьому шарі не враховується.

Над шаром Прандтля розташований шар Екмана, висота якого може перевищувати 1000 м залежно від стабільності атмосферного потоку, параметра Коріоліса та шорсткості земної поверхні. Вище шару Екмана знаходиться вільна атмосфера, де рух повітря наближається до геострофічного.

У межах шару Екмана вплив тертя повітряного потоку об поверхню Землі поступово зменшується і на верхній межі практично зникає, так само як і механічна турбулентність, спричинена нерівностями рельєфу. Дія сили Коріоліса в цьому шарі зумовлює поворот вектора швидкості вітру (рис. 5.5), а його складові за координатами x та y можуть бути визначені за відповідними формулами [46]:

$$u = u_g [1 - \exp(-Az) \cos(Az)], \quad v = u_g \exp(-Az) \sin(Az)$$

де u_g - швидкість геострофічного вітру, $A = F(f)$ - функція параметру Коріоліса - f .

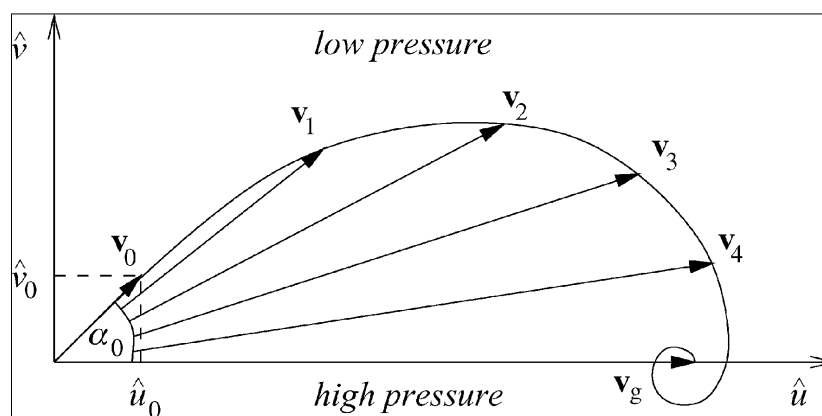


Рис. 5.5 Номограма вектора швидкості вітру.

Оскільки номограма вектора швидкості вітру являє собою спіраль (рис. 5.5) шар Екмана часто називають спіральним шаром.

5.2.2 Логарифмічний профіль швидкості вітру

Математично приземний шар атмосфери описується досить просто. Відомо [29-35], що профіль швидкості вітру по вертикалі в приземному шарі можна описати логарифмічним,

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z+z_0}{z_0} \quad (5.7)$$

або степеневим законами

$$U = az^m \quad (5.8)$$

У формулах (5.1- 5.2): k - постійна Кармана ($k = 0,4 \pm 0,01$), u - швидкість тертя, z - висота над поверхнею землі, z_0 - довжина аеродинамічній шорсткості підстильної поверхні, a і m - постійні, які залежать від шорсткості підстиляючої поверхні ($a = \frac{U_1}{z_1^m}$) і середньої швидкості вітру на висоті флюгера. Слід зазначити, що логарифмічний профіль швидкості має теоретичне обґрунтування [83], в той час як статичної закон не містить теоретичної бази. Разом з тим і той і інший закони досить добре узгоджуються з експериментальними даними [83].

У роботі Е. Сіміу [84] показано, що товщину приземного шару атмосфери, де швидкість повітряного потоку можна описати логарифмічним профілем, можна оцінити за формулою:

$$z_l = b(u_*/f) \quad (5.9)$$

де f - параметр Коріоліса, b – константа ($b = 0,015 - 0,03$ [37]).

Співвідношення (5.9) виражає відомий з лабораторних експериментів факт, що логарифмічний шар охоплює деяку частину (близько 10%) товщини прикордонного шару [37].

Найбільш повні дані про аеродинамічну шорсткість підстилаючої поверхні (z_0 - умовна висота шорсткості поверхні землі, на якій швидкість вітру приймається рівною нулю) наведено у [36], а значення показника ступеня в [37]. Для великих міст $m = 0,33-0,4$, $a \geq 1$. Значення коефіцієнта a і швидкості тертя u_* відповідно до загальноприйнятої методикою для цілей моделювання знаходять за статистичними даними вітрової обстановки в розглянутій місцевості. Зазвичай це дані метеорологічних станцій по середній швидкості і напрямку вітру в районі моделювання.

На рис.5.6 наведено приклади розрахунку вертикального профілю швидкості вітру при різній аеродинамічній шорсткості підстилаючої поверхні z_0 .

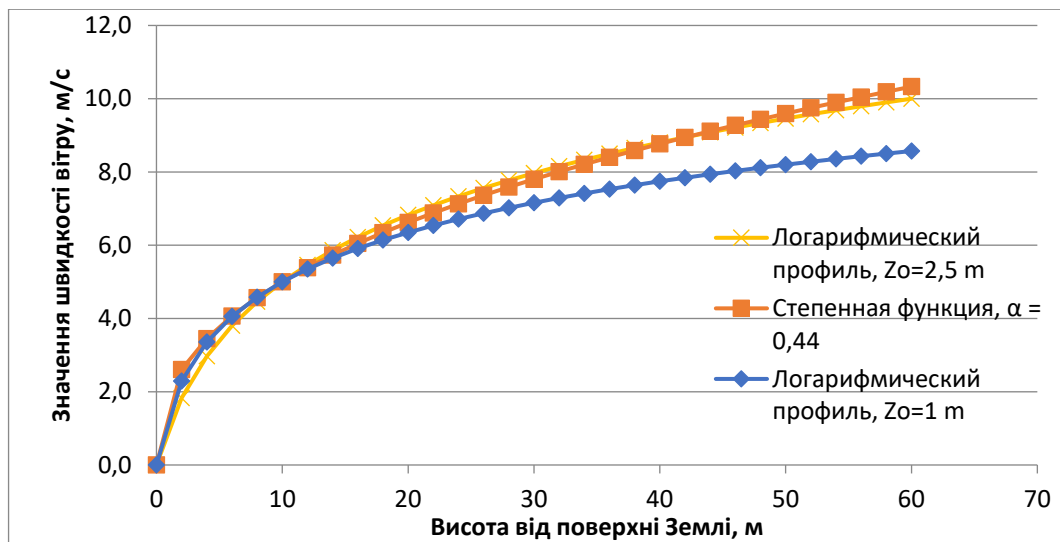


Рис.5.6 Профілі швидкості вітру в ПСА

Вплив аеродинамічній шорсткості поверхні Землі - z_0 , на профіль швидкості вітру в приземному шарі досить значно (рис. 5.6)

Існує певна класифікація шорсткості земної поверхні в залежності від того, що на ній знаходиться. Найбільш повні дані для z_0 наведені в роботі [77] (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 Класифікація ефективної (аеродинамічної) шорсткості земної поверхні

	Z_0 (m)	Опис ландшафта
1	0.0002 “Sea”	Відкрите море чи озеро (незалежно від розміру хвилі), приливні зони, засніжена рівнина, безлика пустеля, асфальт і бетон, з вільною поверхнею в кілька кілометрів.
2	0.005 “Smooth”	Поверхня землі без будь-яких помітних перешкод і з незначною рослинністю, наприклад пляжі, лід без великих хребтів, болота, засніжена чи необроблена відкрита місцевість.
3	0.03 “Open”	Плоска поверхня з низькою рослинністю і ізольованими перешкодами (з відстанню між перешкодами не менше 50 висот перешкоди), наприклад пасовища без вітропреривних перешкод, верес на болотах і в тундрі, площа злітно-посадкової смуги аеропорту.
4	0.10 “Roughly Open”	Культурована або природна територія із зерновими культурами або помірно відкрита місцевість з випадковими перешкодами при відносному горизонтальному відстані не менше 20 висот перешкоди.
5	0.25 “Rough”	Культуровані або природні території з високою рослинністю або з рослинністю різної висоти, з розсіяними перешкодами на відносному відстані від 12 до 15 висот перешкод для пористих об'єктів або від 8 до 12 висот перешкоди для низьких твердих предметів.
6	0.5 “Very Rough”	Інтенсивно культурований ландшафт з багатьма досить великими групами перешкод лісостеп, розділеними відкритих просторів близько 8 висоти перешкоди. Низька щільно посаджена рослинність така, як чагарники, сади, молоді ліси. Крім того, територія помірно покрита невисокими будинками з проміжками від 3 до 7 висот будівлі та без високих дерев.
7	1.0 “Skimming” скольжение	Ландшафт, з порівняно однаковими по висоті, великими перешкодами, з відкритими просторами того ж порядку величини, що і висоти перешкод, наприклад: ліси, густо забудовані площі без особливого зміни висоти будівлі.
8	≥ 2.0 “Chaotic”	Міські центри з сумішню малоповерхових і висотних будівель, або великі ліси з нерегулярними висотами дерев з багатьма прогалинами.

Аеродинамічна шорсткість земної поверхні це параметр, який визначається експериментально, і по мірі збільшення чутливості і точності приладів, до теперішнього часу здійснюються спроби уточнення наведеної вище класифікації.

Так в роботі [85] приведено дещо інша, більш укрупнена класифікація шорсткостей, замість восьми категорій шорсткостей Давенпорта пропонується тільки шість (табл. 5.3). Також в цій роботі приведено у відповідність z_0 (m), яке використовується в логарифмічному профілі, показником ступеня статечного закону розподілу швидкості вітру в ПСА.

Таблиця 5.3 Категорії місцевості

Категорія	Опис місцевості	Аеродинамічна шорсткість z_0 (m)	Показник ступені α
Кат I	Відкрита вода (відкрите море чи озеро, прибережні райони з кількома перешкодами)	0.002	0.103
Кат II	Відкрита місцевість (місцевість з рідкісними перешкод до 10 м заввишки, сільські райони з кількома невисокими будівлями)	0.04	0.15
Кат III	Ліс / передмістя з невисокою забудовою (будівлі 3-5м) (численні перешкоди, розташовані щільно один до одного 3-5м)	0.2	0.198
Кат IV	Міська територія, великі міста (багато будівель середньої висоти (10-50м))	0.5	0.241
Кат V	Місто, (будівлі середньої висоти упереміж з високими будинками (50 м +))	1.0	0.289
Кат VI	Центр міста (концентрація висотних будівель упереміж з іншими будівлями)	≥ 2	0.362

5.2.3 Стратифікація атмосфери

Стратифікація атмосфери – розподіл температури повітря по висоті, що характеризується вертикальним градієнтом температури [$1^\circ/100\text{м}$]. Масштаб турбулентності в АПШ, як і інші характеристики руху повітря, значною мірою залежить від температурної стратифікації.

У денний час, за умов значної сонячної радіації, температура земної поверхні перевищує температуру прилеглого повітря. Тепловий потік від поверхні генерує

вертикальні рухи повітряних мас, що призводить до збільшення висоти верхньої межі АПШ, яка наприкінці дня може досягати 3000 м. Така стратифікація є нестійкою.

У нічний час температура земної поверхні може бути нижчою за температуру навколишнього повітря. Охолодження поверхні призводить до пригнічення турбулентності, і висота прикордонного шару може зменшуватися до 100 м. У цьому випадку стратифікація є стійкою. Якщо процес охолодження або нагрівання поверхні Землі відносно слабкий (наприклад, у кінці дня або за умов сильного вітру), вплив перепаду температур можна знехтувати. Турбулентність у такій ситуації генерується переважно напругою зсуву та в'язкістю, що відповідає нейтральній стратифікації.

Вертикальна стратифікація температури в АПШ визначається не лише теплообміном повітря з підстилаючою поверхнею, але й зміною атмосферного тиску з висотою відповідно до адіабатичного процесу. Рівняння для сухоадіабатичного процесу має вигляд:

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0.286} \quad (5.10)$$

Де T_0 і P_0 - початкові температура і тиск, T і P температура і тиск після адіабатичного зміни стану повітря. У відповідність з формулою (5.10) при підйомі деякого об'єму повітря тиск падає, температура знижується. Зміна температури повітря на кожні 100 м висоти називають вертикальним температурним градієнтом, при сухоадіабатичному процесі він становить $\gamma_c = (0,98 - 1,00)^\circ\text{C}/100\text{м}$. Від величини вертикального температурного градієнта залежить стійкість повітря в певному шарі. Якщо вертикальний градієнт температури в шарі менше вологоадіабатичного ($\sim 0,6^\circ\text{C}$), то цей шар абсолютно стійкий, якщо температурний градієнт більше сухоадіабатичного градієнта, то шар абсолютно нестійкий, якщо знаходиться між γ_c і γ_v , то шар волого-нестійкий, при $\gamma = \gamma_c$ має місце байдуже рівноваго-нейтральна стратифікація, при якій шар повітря, будучи переміщений вгору або вниз повертатися на вихідну висоту не буде.

У даній роботі розглядається приземний шар атмосферного пограничного шару (АПШ) за умов нейтральної стратифікації атмосфери. Повітряний потік рухається над плоскою місцевістю, при цьому середнє значення горизонтальної складової швидкості зростає з висотою та досягає максимуму на верхній межі шару. Водночас турбулентна дотична напруга поступово зменшується і на верхній межі наближається до нуля.

5.2.4 Відмінність прикордонного шару на плоскій пластині від атмосферного прикордонного шару

У межах горизонтальної місцевості з однорідною шорсткістю земної поверхні, на достатньо великих відстанях розгону формуються ділянки, над якими повітряний потік є однорідним у горизонтальному напрямку. При цьому товщина приземного шару атмосфери залишається практично сталою (рис. 5.7).

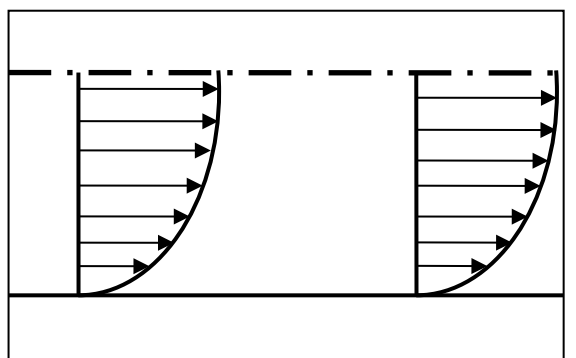


Рис. 5.7 Схема атмосферного прикордонного шару (АПШ)

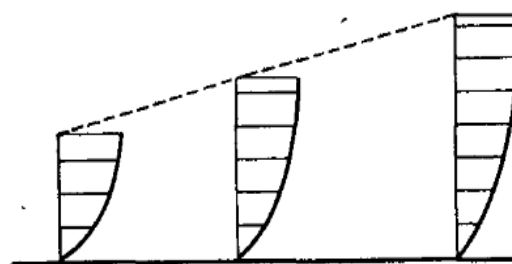


Рис.5.8 Розвиток прикордонного шару на пластині

Це пояснюється тим, що горизонтальний градієнт тиску в пограничному шарі атмосфери на висотах нижче градієнтної висоти лише частково врівноважується силою Коріоліса. Така взаємодія «перезбуджує» середовище та протидіє подальшому зростанню прикордонного шару [84].

На плоскій пластині потік рідини сповільнюється під дією горизонтальних напружень, що обумовлює формування пограничного шару, товщина якого у разі великих чисел Рейнольдса [ШЛ] зростає вниз за течією пропорційно ступеня 0,2 (рис.5.8)

Існування горизонтально-однорідних атмосферних течій підтверджується спостереженнями, це і складає відміну пограничного шару атмосфери від двовимірних пограничних шарів, які виникають при обтіканні плоских пластин.

На рис. 5.9, 5.10 наведено результати розрахунку профілів швидкості в горизонтально однорідному пограничному шарі атмосфери і в прикордонному шарі на плоскій пластині.

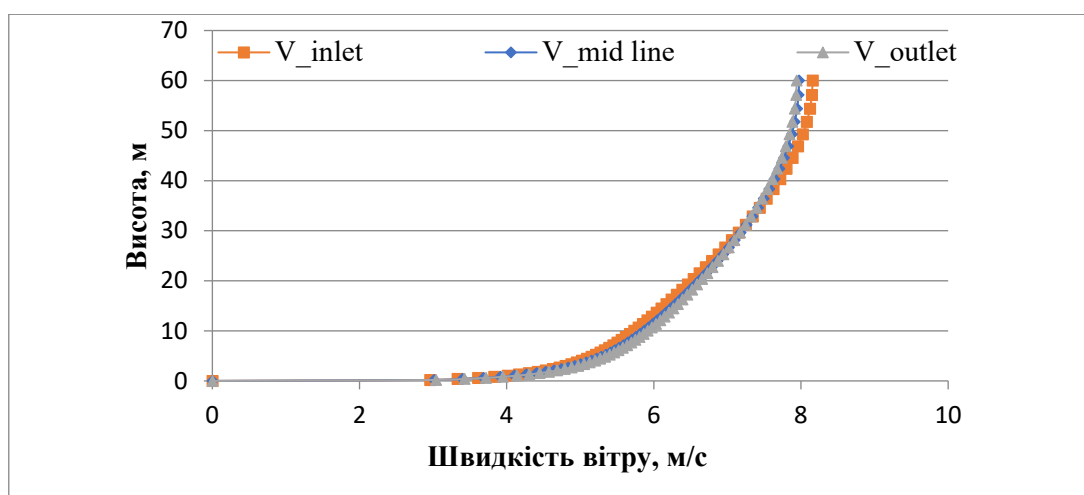


Рис. 5.9 Профілі швидкості в горизонтально однорідному пограничному шарі атмосфери: line inlet - $x = 0\text{m}$, line mid - $x = 175\text{m}$, line outlet - $x = 350\text{m}$

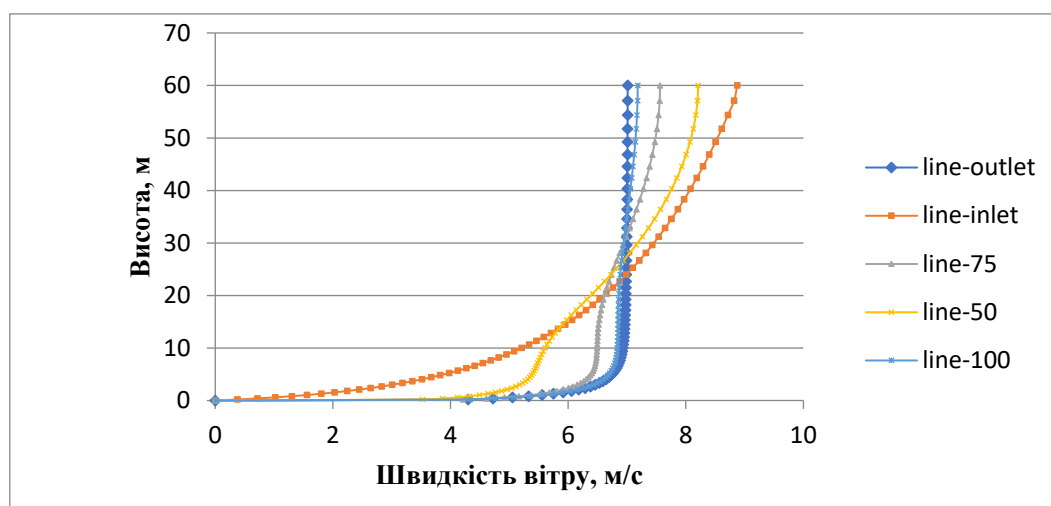


Рис. 5.10 Профілі швидкості в пограничному шарі на пластині:
line inlet - $x = 0\text{m}$, line-50 - $x = 50\text{m}$, line-75 - $x = 75\text{m}$,
line-100 - $x = 100\text{m}$, line outlet - $x = 350\text{m}$

У АПШ профілі швидкості на вході в область рішення, в середині і на виході з області вирішення практично збігаються. По суті, така картина відповідає

горизонтально-однорідному атмосферному течією (рис. 5.9). Горизонтальна неоднорідність течії в пограничному шарі над плоскою пластиною призводить до деформації профілю швидкості в прикордонному шарі вниз за течією, що обумовлено зміною поздовжніх градієнтів тиску (рис. 5.10).

Наведені вище дані отримані в результаті випробування тестової CFD моделі порожній області рішення, з геометричними параметрами, що збігаються з 3D CFD моделлю побудованої для оцінки взаємодії вітрового потоку в приземному шарі атмосфери з комплексом будівель і споруд. Створення тестової моделі також мало на меті валідацію програмного забезпечення, яке використано для оцінки процесів переносу при взаємодії вітрового потоку з будівлями і спорудами, за допомогою вирішення на тестовій моделі простих завдань формування прикордонного шару на плоскій пластині. Нижче наводяться основні параметри тестової моделі.

5.2.5 Побудова та верифікація тривимірної CFD-моделі

У стаціонарній постановці розрахована модель повітряного турбулентного пограничного шару на плоскій пластині з рівномірним профілем швидкості на вході в область рішення. Геометричні параметри області вирішення $x = 0 \div 350\text{м}$, $y = 0 \div 60\text{м}$. У CFD моделі використовувалася стандартна $k - \epsilon$ модель турбулентності з постійними Лаундера і Сполдінга (табл. 5.4).

Таблиця 5.4 Постійні Лаундера і Сполдінга

	C_μ	σ_k	σ_ϵ	$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$
Launder & Spalding 1974	0,09	1	1,3	1,44	1,92

Граничні умови і параметри турбулентності:

Inlet, Outlet, Top, Bottom - відповідні межі області рішення;

Inlet – "Velocity inlet" $V = \text{constant} = 5 \text{ m/s}$, $k = 1$, $\epsilon = 1$ – параметри турбулентності за замовчуванням (ANSYS Fluent - 14);

Outlet – "Pressure outlet" $P = 0$ (gauge pressure), $k = 1$, $\epsilon = 1$ – турбулентності поворотного течії;

Top – "symmetry" – виключає зміну градієнтів по вертикалі на верхній межі області рішення;

Bottom – "wall" + стандартна пристінкова функція з нульовою шорсткістю.

На рис. 5.11 наведено профілі швидкості в пограничному шарі при рівномірному профілі швидкості на вході в область рішення, а на рис. 5.12 – при логарифмічному профілі швидкості.

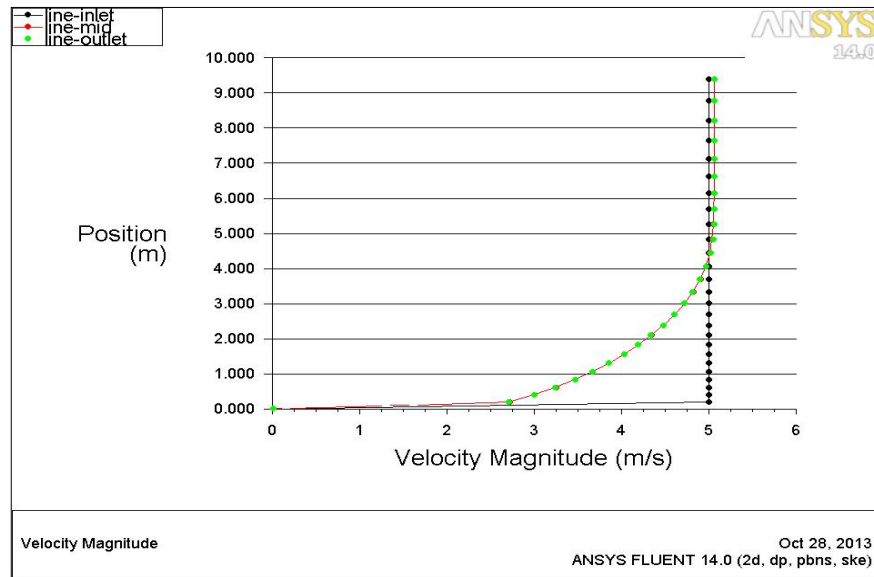


Рис.5.11 Профілі швидкості залежно від поздовжньої координати x області рішення: line inlet - $x = 0$ м, line mid - $x = 175$ м, line outlet - $x = 350$ м

На рис. 5.13 наведено графік зміни швидкості в пограничному шарі на середині пластини, який досить добре апроксимується логарифмічною і статеchnою функціями. Показник ступеня 0,2009 статеchnої функції апроксимації практично точно відповідає показнику ступеня у відомій формулі Прандтля для коефіцієнта тертя на стінці при турбулентному пограничному шарі.

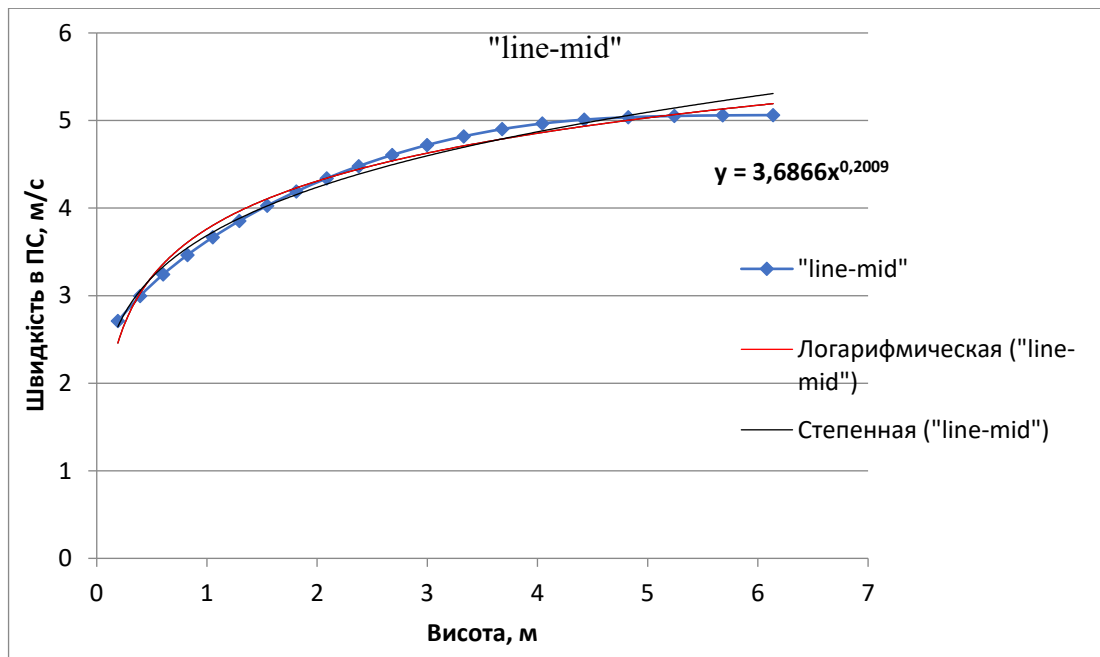


Рис.5.12 Апроксимація профілю швидкості в турбулентному пограничному шарі

Слід зазначити, що засоби CFD-пакетів дозволяють отримати горизонтально однорідний прикордонний шар навіть на плоскій пластині. Для цього достатньо після першого розрахунку зберегти профіль швидкості на виході з розрахункової області та використати його як вхідні дані для повторного розрахунку тієї ж задачі. Такий підхід наведено на рис. 5.13, де порівнюються профілі швидкості на вході та виході розрахункової області.



Рис. 5.13 Порівняння профілів швидкості в ПС при заданому профілі на вході

Отримана незначна відмінність (максимальна відміна профілю швидкості на виході від заданого профілю швидкості на вході становить 4.7% в межах 2 м висоти над поверхнею), дозволяє говорити про те, що над пластиною формується горизонтально однорідний прикордонний шар.

На рис. 5.14 наведено порівняння двох профілів швидкості в прикордонному шарі на виході з розрахункової області. Перший профіль (line – outlet ПС клас.) отримано при розрахунку з рівномірним профілем швидкості на вході, тоді як для другого використовувалася степенева функція розподілу швидкості по висоті розрахункової області. Максимальне відхилення становить 2,37% у зоні до 2 м висоти, що свідчить про слабкий вплив закону зміни швидкості на вході на процеси, які формуються вниз за течією. Основним чинником у цьому випадку є умови тертя на пластині.

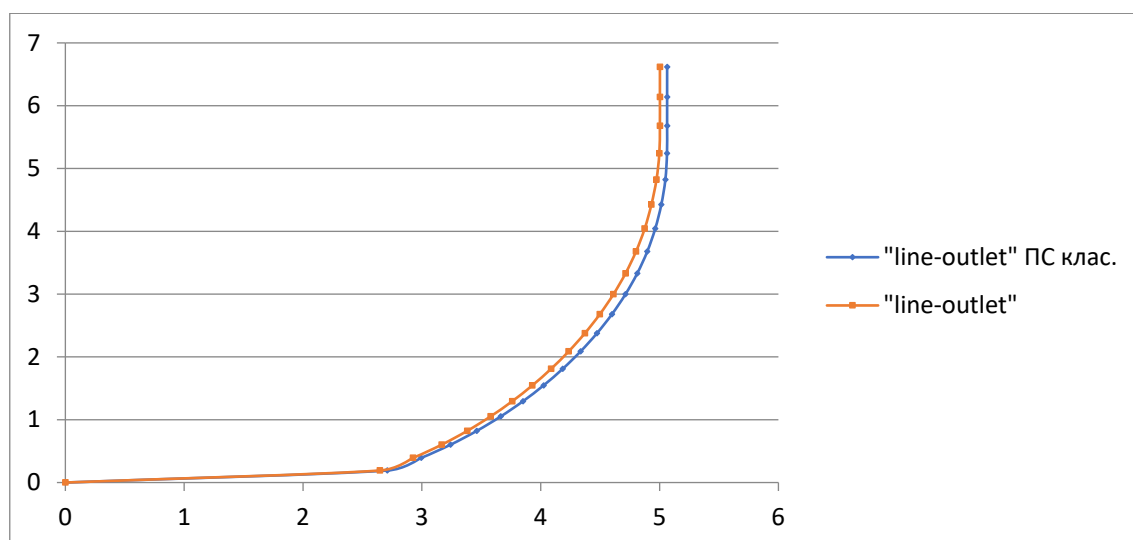


Рис. 5.14 Порівняння профілів швидкості на виході розрахункової області при використанні постійного та степенного профілю швидкості на вході

5.3 Аеродинамічна модель потоків вітру в зоні міської забудови

Рух повітря в атмосфері підпорядковується фундаментальним рівнянням механіки суцільних середовищ. В даному випадку це система рівнянь руху в'язкої рідини Нав'є - Стокса:

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left[v_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_{eff} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[v_{eff} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right]$$

$$\frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[v_{eff} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left[v_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[v_{eff} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right]$$

$$\frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[v_{eff} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_{eff} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left[v_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} \right]$$

Повітряні потоки в турбулентному прикордонному шарі атмосфери традиційно моделюються за допомогою чисельного рішення осереднених по Рейнольдсу системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса, яка замикається двома додатковими рівняннями для кінетичної енергії турбулентності (5.5) і дисперсії кінетичної енергії (5.6). Відповідно з припущеннями про відсутність вертикальної складової швидкості вітру, постійному тиску, як за напрямком руху повітря, так і у вертикальному напрямку і за умови сталості напруги тертя в усьому прикордонному шарі рівняння для кінетичної енергії турбулентності (5.5) і дисперсії кінетичної енергії (5.6) зводяться до :

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5.8)$$

де G_k - генератор кінетичної енергії турбулентності, що залежить від градієнта середньої швидкості потоку, μ_t - турбулентна в'язкість потоку, яка розраховується за формулою:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5.9)$$

C_μ , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, σ_k , σ_ϵ - постійні, значення яких спочатку були запропоновані Лаундер і Сполдінг для випадків течії рідини і газу в різних технологічних пристроях відносно невеликого розміру і, які закладені в пакети CFD моделювання, такі як FLUENT, Star CCM і др.:

$$C_{\mu} = 0.09, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, \sigma_k = 1, \sigma_{\varepsilon} = 1.3 \quad (5.10)$$

Постійні (5.8) були визначені експериментально та успішно застосовуються для вирішення широкого кола технологічних завдань течії рідин і газу. Водночас, як показано в [85] стандартні значення постійних, що використовуються за замовчуванням у CFD-пакетах, не придатні для моделювання вітрового потоку в атмосферному прикордонному шарі. Це підтверджується експериментальними даними, зокрема [86].

У зв'язку з цим, починаючи з 80-х років минулого століття, низкою дослідників були отримані інші значення постійних в $k - \varepsilon$ моделі турбулентності, які наведені в табл. 5.5. В роботі було використано коефіцієнти, наведені в роботі [86].

Таблиця 5.5 Значення коефіцієнтів для $k-\varepsilon$ моделі турбулентності [Yang, IslamAbohela1, FinalReport]

	Launder & Spalding 1974	Richards & Hoxey 1993	Panofsky & Dutton 1984	Detering&Etling 1985, Duynkerke 1988	Beljaars 1987	RNG $k\varepsilon$ model Yakhot&Orszag 1986	Yang et al. 2009 [21]
C_{μ}	0.09	0.012	0.033	0.033	0.033	0.085	0.028
σ_k	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7179	1.67
σ_{ε}	1.3	3.22	1.3	2.38	1.85	0.7179	2.51
$C_{1\varepsilon}$	1.44	1.2	1.176	1.46	1.44	1.42	1.5
$C_{2\varepsilon}$	1.92	1.92	1.92	1.83	1.92	1.68	1.92
C_1	-0.55						-0.17
C_2	-5.21						1.62

На двовимірній моделі порожній області приземного шару атмосфери при однакових умовах були проведені тестові розрахунки профілів швидкості вітру при використанні стандартної $k-\varepsilon$ моделі турбулентності з різними значеннями постійних моделі турбулентності.

Для проведення тестових розрахунків з оцінки наведених вище моделей турбулентності побудована двовимірна CFD модель з наступними параметрами:

1. Геометричні розміри порожньої області: 350 x 60 м; з нерівномірною сіткою (рис.5.15)
2. Граничні умови і параметри турбулентності: Inlet, Outlet, Top, Bottom - відповідні межі області рішення; Inlet - "Velocity inlet"

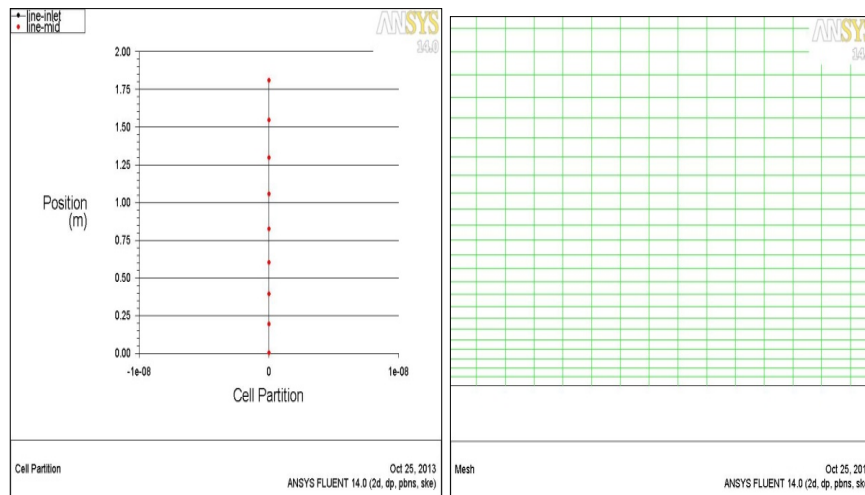


Рис. 5.15 Розміри та конфігурація сітки у поверхні землі

На вході в область рішення задавалися профіль швидкості і параметри турбулентності повністю розвиненого турбулентного горизонтально однорідного вітрового потоку.

Результати розрахунку профілів швидкості в порожній області при різних моделях турбулентності наведені на Рис. 5.16 – 5.18.

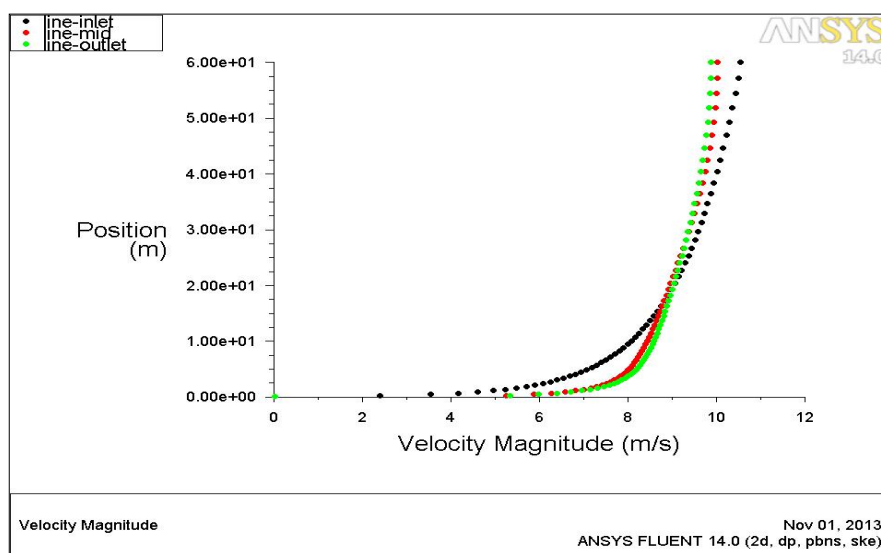


Рис. 5.16 Launder & Spalding 1974

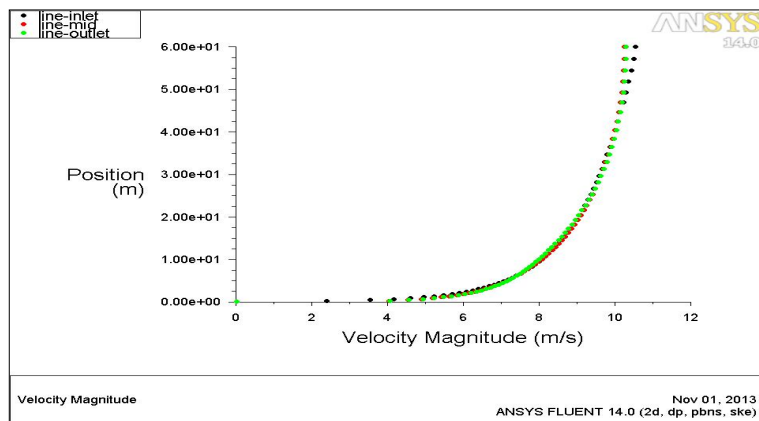


Рис.5.17 Richards & Hoxey 1993

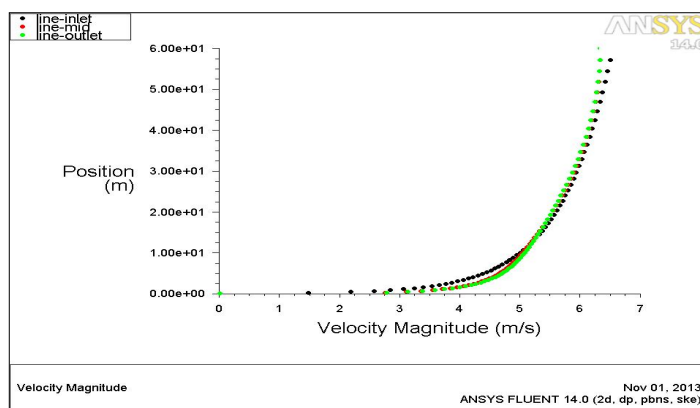


Рис. 5.18 Panofsky & Dutton 1984

Результати розрахунку показали, що найбільш однорідний вітрової потік в приземному шарі атмосфери, тобто практичне збіг профілів швидкості на вході в розрахункову область "line inlet", в середині області - "line mid" і на виході з області рішення - "line outlet" дає стандартна k-ε модель турбулентності з коефіцієнтами Річарда і Хоксі 1993р, яка в подальшому використовувалася для розрахунку тривимірних моделей з будівлями і спорудами. Перевірка інших моделей турбулентності є предметом подальших досліджень.

5.3.1 Розрахункова область території забудови

У даній роботі в тривимірній постановці розглядається частина приземного шару атмосфери, в якому розташований комплекс будівель ІТТФ НАН України (рис. 5.19) за адресою м. Київ, вул. Булаховського, 2.

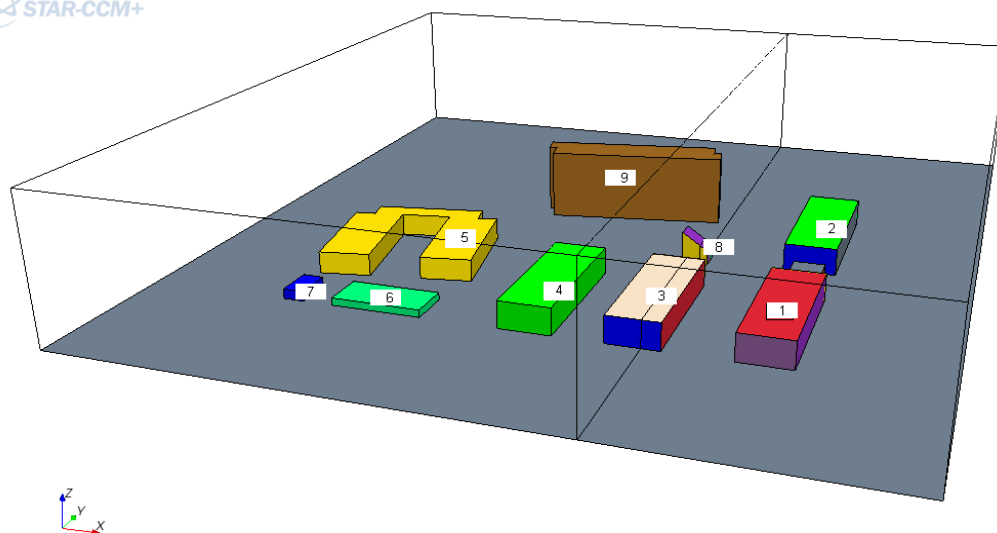


Рис. 5.19 Геометрична модель комплексу будівель на місті забудови

Будинки і споруди моделюються прямокутниками, що зберігають основні геометричні розміри і конфігурацію:

- 1 - 4 лабораторні корпуси (20x60x11 м);
- 5 - дослідне виробництво - будівля складної конфігурації, в плані займає квадрат 60x60 м, висота будівлі 9 м, відстань між цехами 20 м;
- 6 - гараж (35x17x3 м);
- 7 - трансформаторна підстанція (8x15x4 м);
- 8 - дослідний дім «нуль енергії» (10x8x13 м);
- 9 - адміністративний корпус (71x17x29 м).

Розміри області рішення $x = 295$ м, $y = 320$ м, $z = 60$ м, визначені у відповідності з рекомендаціями [82] в залежності від висоти найвищої будівлі в комплексі.

Розрахункова сітка

На рис. 5.20 наведено фрагмент розрахункової сітки області рішення задачі.

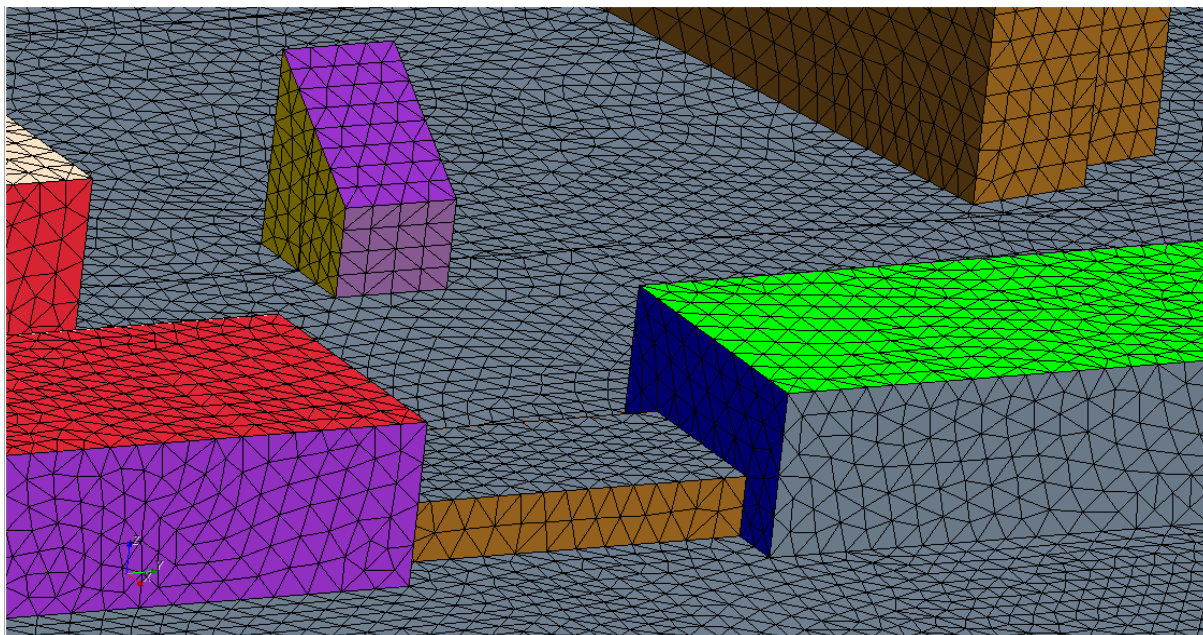


Рис. 5.20 Фрагмент розрахункової сітки моделі.

Нижче наведено основні характеристики тривимірної розрахункової сітки області розрахунку:

кількість клітинок: 846158

кількість граней клітинок: 5595828

Область розрахунку: x : [0 ... 295] м; y : [0 ... 320] м; z : [0 ... 60] м

У роботі [79] проведено аналіз чутливості результатів моделювання до вертикальної дискретизації розрахункової області при моделюванні атмосферного пограничного шару (АПС) у порожньому просторі за різних значень аеродинамічної шорсткості земної поверхні z_0 . Показано, що результати практично не змінюються, починаючи з 20 розподілів області по вертикалі при висоті 500 м.

Вітрова статистика

Вихідні дані про силу й напрямки вітру в досліджуваній області відповідають даним метеорологічної станції «Жуляни». Вимірювання швидкості і напрямку вітру проводилися на протязі 2-х років з інтервалом осереднення 3 години. Подальша обробка даних фахівцями ІТТФ дозволила побудувати відповідну розу вітрів – рис. 5.21 і визначити середню швидкість вітру по 8 румбах на висоті флюгера (10 м) - табл.5.5.

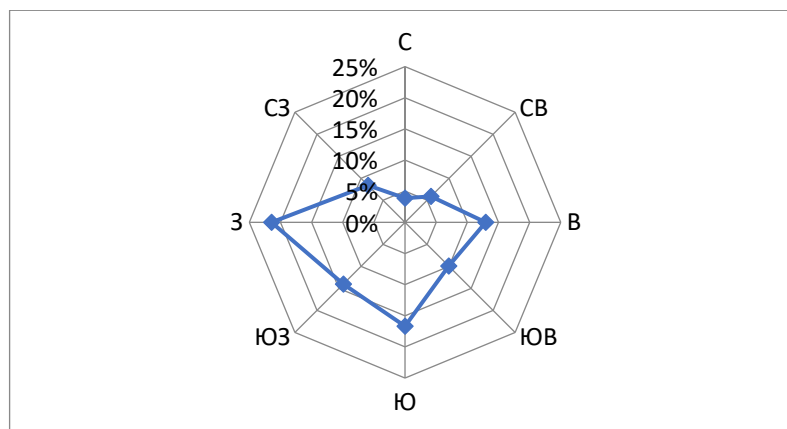


Рис. 5.21 Роза вітрів в районі дослідження

Таблиця 5.5 Напрямок та швидкість вітру

Румб	Пн	Пн-Сх	Сх	Пд-Сд	Пд	Пд-Зх	Зх	Пн-Зх
Роза вітрів	4%	6%	13%	10%	17%	14%	21%	8%
Середня швидкість вітру, м/с	3,4	3,9	3,4	3,0	3,4	3,2	5,0	4,7

З наведених даних видно, що в районі дослідження переважають західні і південно-західні вітри.

Початкові та граничні умови

Рух повітряного потоку в області вирішення задачі визначається умовами на межах області. Нижче наведено граничні умови, які були визначені в даній моделі.

Умови на вході в область рішення

Відомо, що вертикальний профіль швидкості вітру над підстильною поверхнею в ізотропному (гомогенному) пограничному шарі атмосфери можна описати логарифмічним або степеневим законом. Як показано в [80] при порівнянні з експериментальними даними, переваги одного закону над іншим не знайдено. Однак, в [80] показано, що в нижній області АПШ краще працює логарифмічний закон, а у верхній області - степеневий. У розглянутій моделі використовується логарифмічний закон профілю швидкості. Профіль швидкості на вході та початкове поле швидкостей в області вирішення задавалося відповідно до формули (5.5).

Кінетична енергія турбулентності і дисипація відповідно задавалися за формулами [81]:

$$k(z) = \frac{u_f^2}{\sqrt{C_\mu}} \sqrt{C_1 \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) + C_2} \quad (5.11)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{u_f^3}{k} \frac{1}{z+z_0} \sqrt{C_1 \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) + C_2} \quad (5.12)$$

Умови на верхній і нижній границях області рішення

Нижня границя області рішення моделювалась як непроникна стінка, верхня - як площина симетрії. Останнє дозволяє виключити вертикальну складову швидкості вітру, що є одним з припущень моделі

Умови на виході з області рішення

На виході з області рішення задавалося умова «тиск на виході». Величина тиску на виході становила 101325 Па.

Результати досліджень аеродинаміки в зоні забудови

У результаті випробування чисельної моделі взаємодії вітрового потоку в приземному шарі атмосфери з комплексом будівель і споруд, щодо компактно розташованих в межах міської забудови, отримані поля швидкостей, тисків і енергетичних параметрів вітру. Наводяться основні результати моделювання для західного напрямку вітру, як найбільш ймовірного напрямку враховуючи дані вітрової статистики. На рис.5.22 показані площини перетину моделі, з яких знімалися поля основних параметрів.

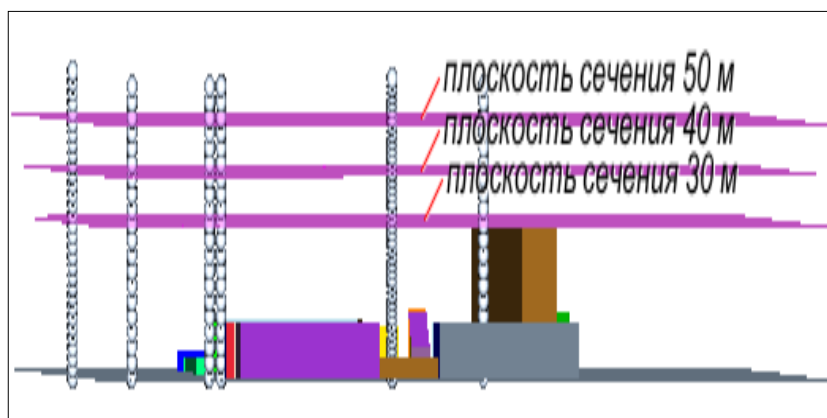


Рис.5.22 Горизонтальні площини перетину відображення польових даних

Визначалися поля швидкості (рис. 5.23,5.24) і тиску в розглянутому повітряному потоці, що омиває споруди (рис.5.25).

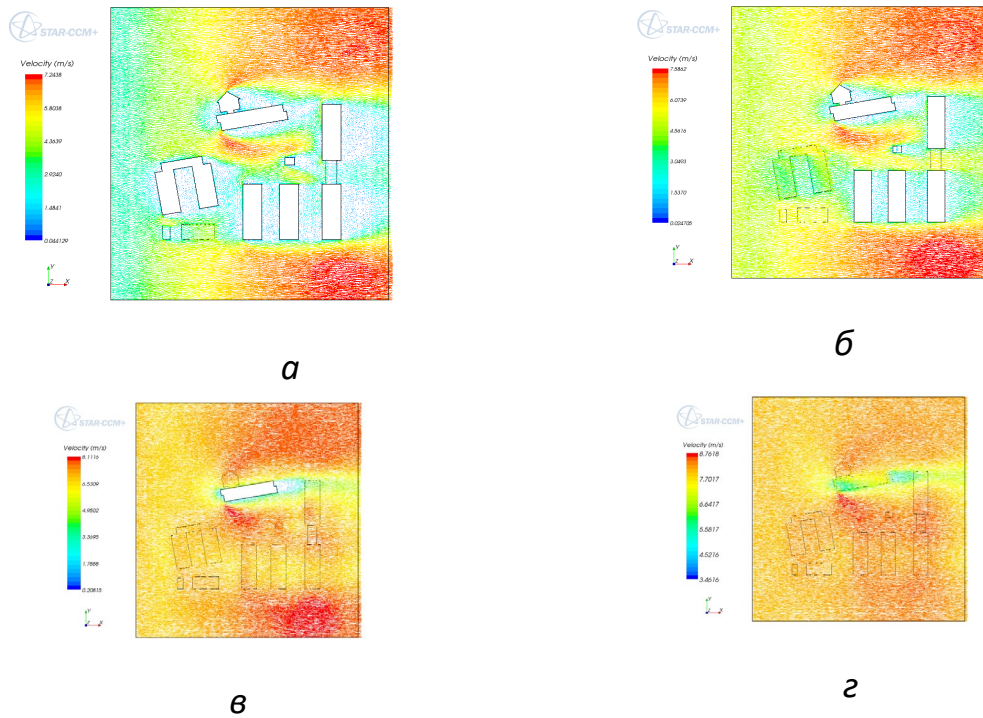


Рис. 5.23 Поля швидкостей при північному вітрі на висоті:

a – 4м, *б* - 10 м, *в* - 20 м, *г* - 30м.

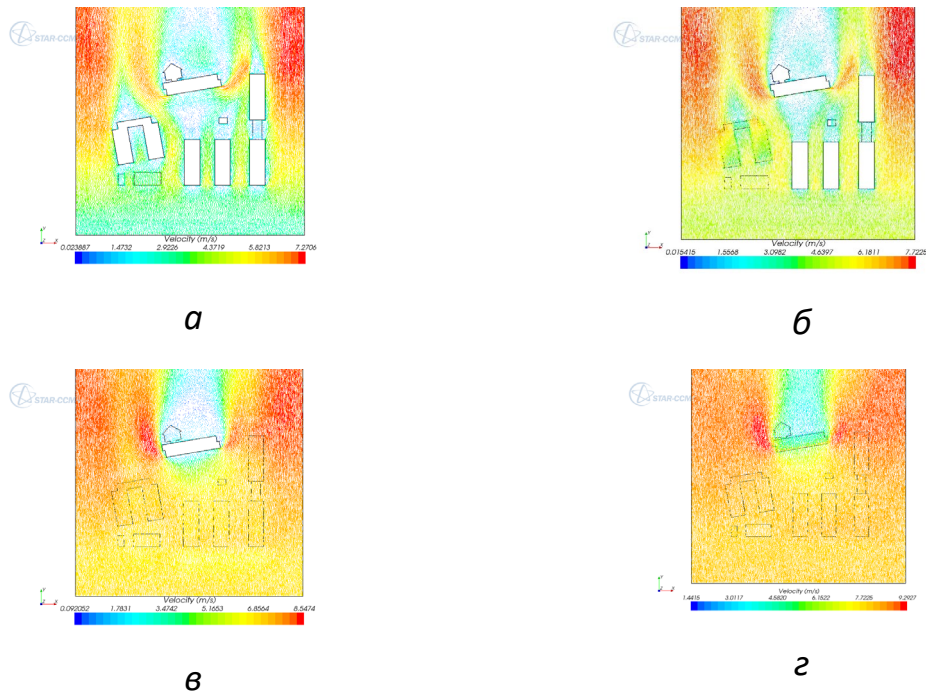


Рис. 5.24 Поля швидкостей при західному вітрі на висоті:

a – 4м, *б* – 10 м, *в* – 20 м, *г* – 30м.

Однією з основних цілей створення моделі було встановлення зовнішніх граничних умов для проектування систем вентиляції експериментального будинку пасивного типу та реконструкції вентиляції інших будівель Інституту. Відомо, що поля тисків на огорожувальних будівлю конструкціях є визначальними параметрами для систем вентиляції та теплопостачання

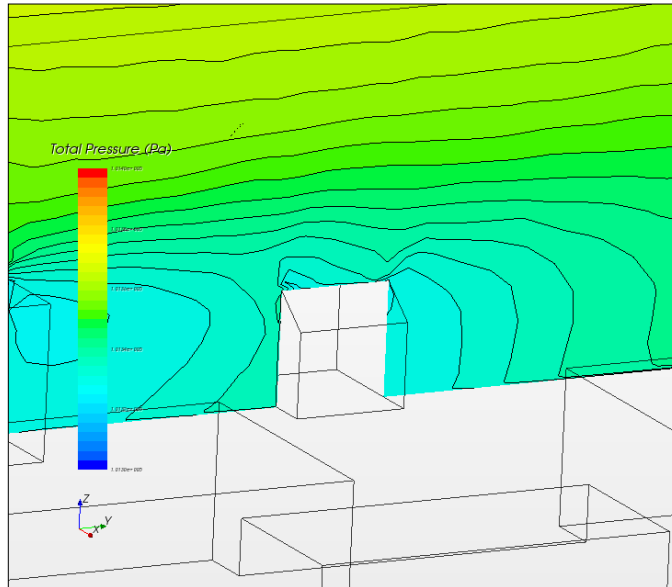


Рис.5.25 Поле тисків на місті забудови експериментального будинку

Оцінка енергетичних характеристик вітрового потоку

При оцінці вітрового потоку з точки зору його ефективності для вітрових енергетичних установок зазвичай оцінюють наступні параметри:

коефіцієнт швидкості:

$$K_s = \frac{U - U_{in}}{U_{in}}$$

потужність вітрового потоку:

$$P = C_p A \frac{\rho U^3}{2}$$

нормалізована кінетична енергія турбулентності ТКЕ:

$$TKE = \frac{K}{U_{in}^2}$$

інтенсивність турбулентності:

$$It = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}K}}{U}$$

Нижче на рис. 5.26-5.29 приведені поля зазначених параметрів.

В результаті виконання роботи створена чисельна модель процесів переносу при взаємодії вітрового потоку в приземному шарі атмосфери з комплексом будівель і споруд, компактно розташованих в межах міської забудови. В результаті чисельної реалізації моделі отримані тривимірні поля швидкостей і тисків вітрового потоку, необхідних для проектування систем вентиляції та тепlopостачання експериментального будинку пасивного типу та інших будівель і споруд. Отримано тривимірні поля параметрів вітрового потоку: коефіцієнт швидкості, потужність вітрового потоку, інтенсивність турбулентності, кінетична енергія турбулентності, необхідних для оптимального розміщення вітроенергетичних установок в умовах міської забудови.

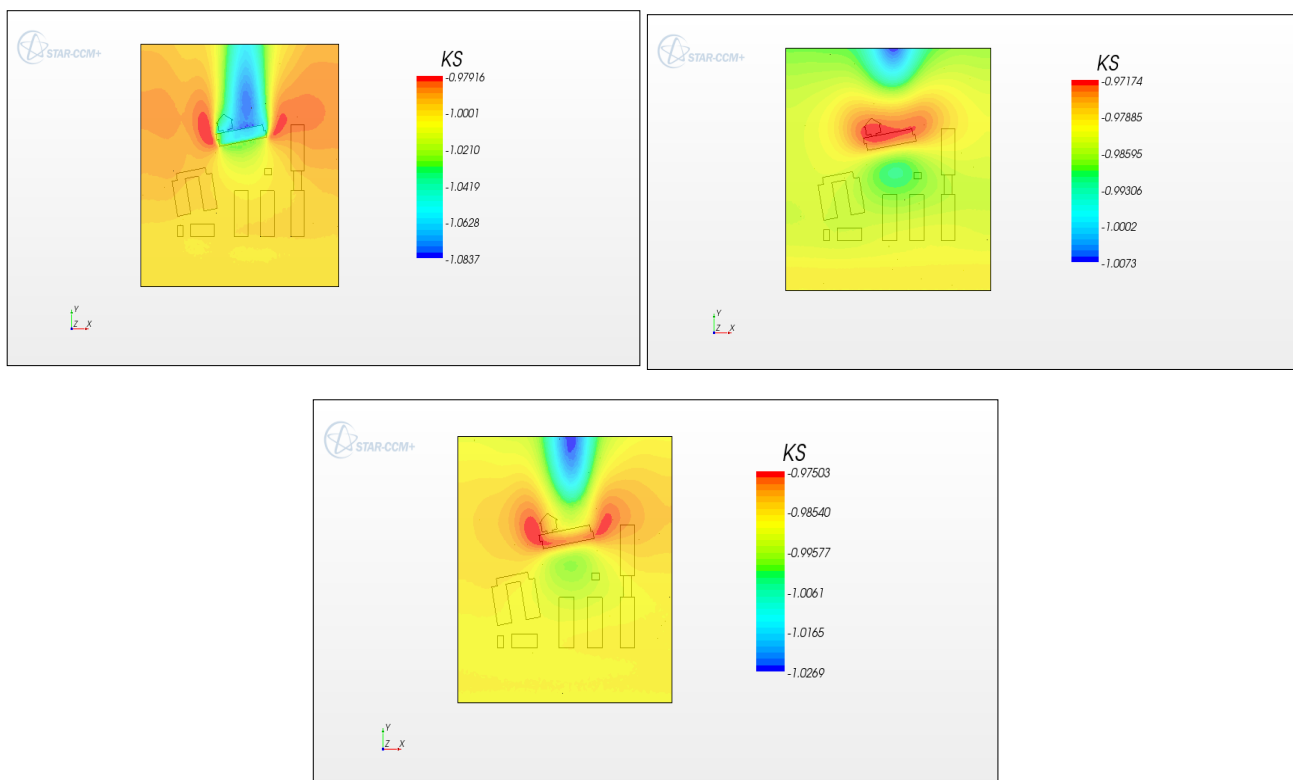


Рис.5.26 Коефіцієнт швидкості на висоті h=30м, h=40м, h=50м

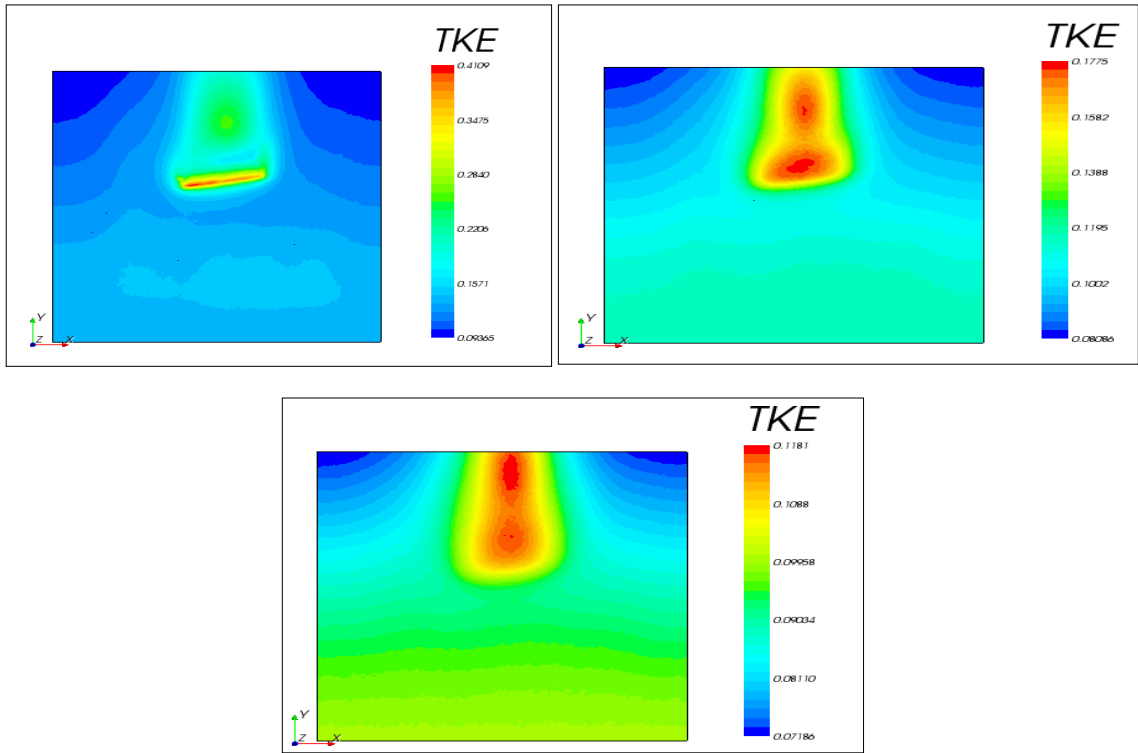


Рис. 5.27 Нормалізована кінетична енергія турбулентності на висоті $h=30\text{м}$, $h=40\text{м}$, $h=50\text{м}$

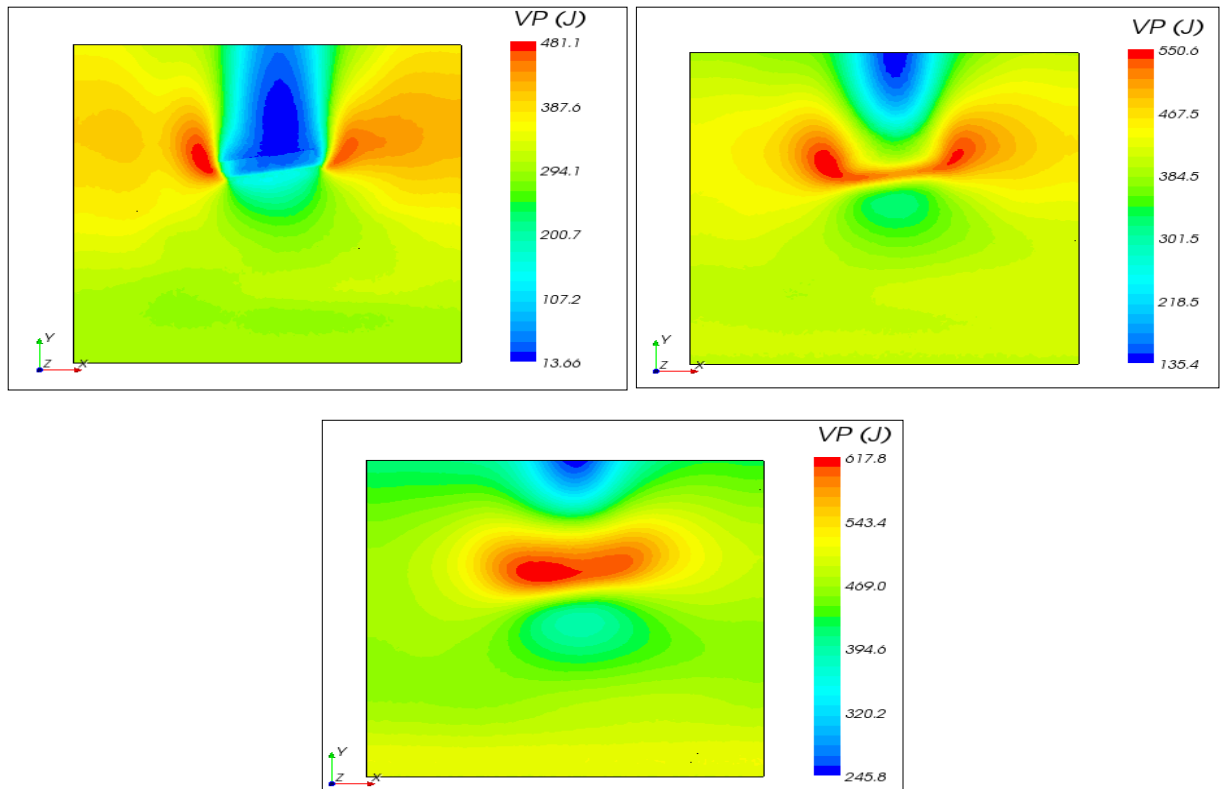


Рис. 5.28 Потужність вітрового потоку на висоті $h=30\text{м}$, $h=40\text{м}$, $h=50\text{м}$

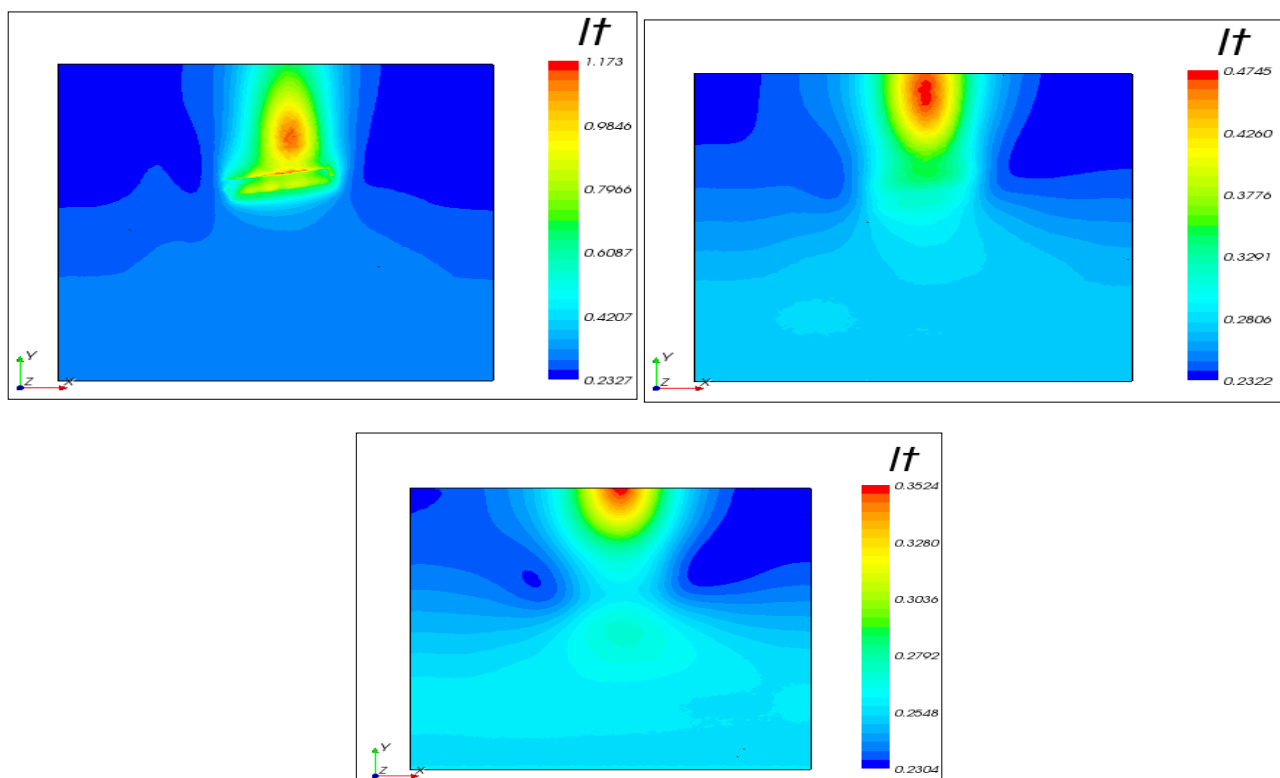


Рис. 5.29 Інтенсивність турбулентності на висоті $h=30\text{м}$, $h=40\text{м}$, $h=50\text{м}$

Висновки до розділу

1. У розділі досліджено вплив аеродинамічних умов у зоні міської забудови на процеси тепловіддачі зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель. Показано, що інтенсивність тепловтрат фасадів суттєво залежить від геометрії будівель, їх взаємного розташування, орієнтації відносно напрямків вітру та характеристик підстильної поверхні.
2. Встановлено, що коефіцієнт тепловіддачі зовнішніх поверхонь визначається комплексною дією швидкості вітру, температурного перепаду, шорсткості поверхні та турбулентності повітряного потоку. Показано, що в умовах міської забудови переважає турбулентний режим обтікання, який забезпечує підвищену інтенсивність теплообміну.
3. Експериментально підтверджено, що пульсації швидкості вітрового потоку безпосередньо впливають на коливання густини теплового потоку через огорожувальні конструкції. Встановлено, що навіть незначні зміни швидкості вітру призводять до суттєвих змін коефіцієнта тепловіддачі.

4. Показано, що зовнішні кліматичні фактори (вітер, опади, сонячна радіація) спричиняють значні коливання теплових потоків на зовнішніх поверхнях фасадів, тоді як внутрішні теплові потоки є більш стабільними.
5. Розглянуто структуру атмосферного пограничного шару та встановлено особливості формування профілю швидкості в приземному шарі атмосфери. Підтверджено доцільність використання логарифмічного закону розподілу швидкості вітру для моделювання процесів у приземному шарі.
6. Встановлено суттєвий вплив аеродинамічної шорсткості підстильної поверхні на профіль швидкості вітру та інтенсивність теплообміну, що необхідно враховувати при моделюванні умов обтікання будівель у міській забудові.
7. Виконано чисельне моделювання вітрового потоку в зоні забудови із застосуванням CFD-підходу. Показано, що використання стандартних параметрів k - ϵ моделі турбулентності є недостатньо точним для атмосферного прикордонного шару, а найбільш адекватні результати забезпечує модель із коефіцієнтами Richards & Noxy.
8. У результаті чисельного моделювання отримано тривимірні поля швидкостей, тисків і турбулентних характеристик повітряного потоку, що дозволяє визначати зовнішні граничні умови для розрахунку систем вентиляції та теплопостачання будівель.
9. Встановлено, що взаємний вплив будівель у щільній забудові призводить до суттєвої просторової неоднорідності полів швидкості та тиску, що необхідно враховувати при проектуванні енергоефективних будівель і інженерних систем.
10. Отримані результати можуть бути використані для оцінки енергетичних характеристик вітрового потоку, оптимального розміщення вітроенергетичних установок, а також для підвищення ефективності архітектурно-планувальних і інженерних рішень у міській забудові.

РОЗДІЛ 6. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СТІНОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

6.1 Вибір оптимальної товщини шару утеплювача на зовнішній поверхні огорожувальних конструкцій будівлі.

Одним із ключових факторів забезпечення енергоефективності будівель є раціональний вибір товщини теплоізоляційного шару в огорожувальних конструкціях. Оптимальна товщина утеплювача повинна забезпечувати виконання нормативних вимог до теплозахисту будівель, а також бути економічно доцільною з точки зору витрат на термомодернізацію та подальшої економії енергоресурсів.

Під час визначення оптимальної товщини теплоізоляції необхідно враховувати комплекс факторів, серед яких кліматичні умови регіону, теплофізичні характеристики матеріалів огорожувальної конструкції, коефіцієнт теплопровідності утеплювача, а також конструктивні особливості будівлі. Важливим критерієм є забезпечення нормативного значення опору теплопередачі зовнішніх стін відповідно до чинних будівельних норм.

Для кліматичних умов України, зокрема для першої кліматичної зони, сучасні вимоги до енергоефективності будівель передбачають значне підвищення теплозахисних характеристик огорожувальних конструкцій. При використанні поширених теплоізоляційних матеріалів, таких як базальтова вата або пінополістирол, товщина утеплювача для досягнення рівня енергоефективного будинку зазвичай становить приблизно 10–12 см. У цьому випадку питоме споживання теплової енергії на потреби опалення може зменшуватися до приблизно 70 кВт·год/м² на рік.

Для будівель із підвищеним рівнем енергоефективності необхідне збільшення товщини теплоізоляційного шару до 20–25 см, що дозволяє знизити річне споживання теплової енергії до 40–45 кВт·год/м². У разі проектування будівель пасивного типу, для яких характерні мінімальні тепловтрати, товщина теплоізоляції зовнішніх стін може досягати 30–35 см, що забезпечує зменшення енергоспоживання на опалення до 20–25 кВт·год/м² на рік.

Важливо зазначити, що збільшення товщини теплоізоляційного шару призводить до зменшення тепловтрат через огорожувальні конструкції, проте ефективність додаткового утеплення з часом зменшується. Після досягнення певного значення товщини утеплювача подальше його збільшення призводить до незначного покращення теплозахисних характеристик при значному зростанні вартості конструкції. Тому визначення оптимальної товщини теплоізоляції повинно базуватися на поєднанні теплотехнічного та економічного аналізу.

З практичної точки зору для більшості житлових будівель оптимальною є товщина теплоізоляційного шару в межах 120–150 мм при використанні сучасних утеплювачів із низьким коефіцієнтом теплопровідності. Такий підхід дозволяє забезпечити виконання нормативних вимог до теплозахисту будівель, знизити тепловтрати та підвищити загальний рівень енергоефективності будівлі.

Таким чином, визначення оптимальної товщини теплоізоляційного шару повинно базуватися на комплексному аналізі теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій, кліматичних умов та економічної ефективності застосування теплоізоляційних матеріалів. Раціональний вибір товщини утеплювача дозволяє забезпечити необхідний рівень енергоефективності будівель і зменшити експлуатаційні витрати на опалення.

6.2 Оцінка економічної ефективності утеплення

Оцінка економічної ефективності утеплення огорожувальних конструкцій є важливим етапом прийняття рішень щодо впровадження заходів з підвищення енергоефективності будівель. Проведення такого аналізу дозволяє визначити доцільність інвестицій у теплоізоляційні роботи та оцінити можливу економію енергоресурсів протягом експлуатації будівлі.

Економічна ефективність утеплення визначається співвідношенням початкових витрат на проведення термомодернізації та економії витрат на опалення, яка досягається за рахунок зменшення тепловтрат через огорожувальні конструкції.

Основними показниками, що використовуються для оцінки ефективності утеплення, є період окупності інвестицій, величина річної економії енергії та загальний економічний ефект протягом життєвого циклу будівлі.

Для визначення річної економії енергії після утеплення використовується наступна формула:

$$E_{\text{ек}} = (K_1 - K_2) \cdot A \cdot \Delta T \cdot H \quad (6.1)$$

де:

K_1, K_2 – коефіцієнти теплопередачі стіни до та після утеплення, Вт/(м²·К);

A – площа утепленої поверхні, м²;

ΔT – середня різниця температур між приміщенням та зовнішнім середовищем, °С;

H – опалювальний період, годин.

Окупність утеплення визначається за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{C_{\text{ут}}}{E_{\text{ек}} \cdot C_{\text{ен}}} \quad (6.2)$$

де:

$C_{\text{ут}}$ – вартість утеплення, грн;

$E_{\text{ек}}$ – щорічна економія енергії, кВт·год;

$C_{\text{ен}}$ – вартість 1 кВт·год енергії, грн.

Для оцінки економічної ефективності утеплення розглянемо приклад житлового будинку площею 150 м². До проведення термомодернізації коефіцієнт теплопередачі стін становив 1,2 Вт/(м²·К). Після утеплення мінеральною ватою товщиною 150 мм він зменшився до 0,25 Вт/(м²·К). Опалювальний період приймається рівним 4400 годин на рік, а середня вартість теплової енергії – 3 грн за 1 кВт·год.

Слід зазначити, що фактичний строк окупності може змінюватися залежно від вартості енергоносіїв, кліматичних умов, технічного стану будівлі та характеристик використаних теплоізоляційних матеріалів. У довгостроковій

перспективі застосування теплоізоляції дозволяє значно знизити витрати на експлуатацію будівлі та підвищити її енергетичну ефективність.

Зменшення тепловтрат після утеплення відбувається внаслідок зниження коефіцієнта теплопередачі огорожувальних конструкцій. Чим нижчим є значення цього коефіцієнта, тим менше теплової енергії втрачається через стіни будівлі. Таким чином, застосування теплоізоляційних матеріалів дозволяє суттєво скоротити витрати теплової енергії на опалення приміщень.

Економічна доцільність утеплення значною мірою залежить від вартості теплоізоляційних матеріалів, витрат на монтажні роботи, площі утеплюваних конструкцій, а також вартості енергоносіїв. Важливу роль відіграють і експлуатаційні фактори, такі як тривалість опалювального періоду, кліматичні умови регіону та рівень теплоізоляції інших елементів будівлі (вікон, покрівлі, підлоги тощо).

Слід зазначити, що початкові витрати на утеплення можуть бути відносно значними, однак у процесі експлуатації будівлі вони компенсуються за рахунок зменшення витрат на опалення. У більшості випадків термомодернізація будівель дозволяє знизити споживання теплової енергії на 30–60 %, що забезпечує суттєву економію енергоресурсів.

Крім економічного ефекту, утеплення будівель має і важливі екологічні переваги. Зменшення споживання теплової енергії призводить до скорочення використання паливних ресурсів та зниження викидів парникових газів у атмосферу. Таким чином, впровадження енергоефективних технологій у будівництві сприяє не лише зменшенню експлуатаційних витрат, але й покращенню екологічної ситуації.

Додатковою перевагою утеплення є підвищення рівня теплового комфорту у приміщеннях. Завдяки зменшенню тепловтрат підвищується температура внутрішніх поверхонь стін, що зменшує ризик утворення конденсату та покращує мікроклімат приміщень.

Таким чином, проведений аналіз свідчить про те, що утеплення огорожувальних конструкцій є ефективним заходом підвищення

енергоефективності будівель. Раціональне поєднання технічних та економічних критеріїв при виборі теплоізоляційних матеріалів дозволяє забезпечити оптимальний баланс між витратами на термомодернізацію та довгостроковою економією енергоресурсів.

Для оцінки ефективності утеплення доцільно порівняти основні теплоізоляційні матеріали, що використовуються у будівництві. Основними параметрами, які впливають на економічну доцільність їх застосування, є коефіцієнт теплопровідності, товщина утеплювача, вартість матеріалу та можливе зниження тепловтрат через огорожувальні конструкції.

Таблиця 6.1 Порівняльна характеристика теплоізоляційних матеріалів

Матеріал	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	Рекомендована товщина утеплення, мм	Орієнтовна вартість, грн/м ²	Очікуване зниження тепловтрат
Мінеральна вата	0,038–0,042	120–150	2200–2600	40–55 %
Пінополістирол (ППС)	0,035–0,040	100–140	2000–2400	40–60 %
Екструдований пінополістирол	0,030–0,034	80–120	2500–3000	45–60 %
Пінополіуретан	0,022–0,028	60–100	3200–3800	50–65 %
Піноскло	0,040–0,050	140–180	3500–4200	35–50 %

З таблиці видно, що найбільш ефективними з точки зору теплоізоляційних властивостей є пінополіуретан та екструдований пінополістирол, які мають найнижчі значення коефіцієнта теплопровідності. Водночас традиційні матеріали, такі як мінеральна вата та пінополістирол, характеризуються оптимальним співвідношенням вартості та теплоізоляційної ефективності, що пояснює їх широке застосування у практиці будівництва.

Для прикладу проведемо розрахунок економічної ефективності утеплення зовнішніх стін житлового будинку площею 150 м².

Для розрахунку приймаємо наступні параметри:

- будинок площею 150 м² з початковим коефіцієнтом теплопередачі стін 1,2 Вт/(м²·К). Після утеплення мінеральною ватою товщина 150 мм коефіцієнт становить 0,25 Вт/(м²·К);
- тривалість опалювального періоду 4400 год/ рік;

- вартість утеплення 2500 грн/м² (з урахуванням матеріалів і монтажу);
- вартість теплової енергії – 3 грн/кВт·год.

Річна економія теплової енергії за формулою (6.1) становить:

$$E \approx 12500\text{--}14000 \text{ кВт}\cdot\text{год на рік}$$

Річна економія коштів становитиме:

$$C \approx 13000 \cdot 3 = 39000 \text{ грн/рік}$$

Якщо загальна вартість утеплення становить приблизно 350–400 тис. грн, то орієнтовний строк окупності складе 8–10 років.

Проведений аналіз показує, що утеплення зовнішніх огорожувальних конструкцій дозволяє суттєво знизити тепловтрати будівель і забезпечити економію енергоресурсів. Найбільш доцільним є застосування теплоізоляційних матеріалів із низьким коефіцієнтом теплопровідності та оптимальним співвідношенням вартості і теплоізоляційних властивостей.

Раціональний вибір типу утеплювача та товщини теплоізоляційного шару дозволяє забезпечити виконання нормативних вимог до теплозахисту будівель і досягти значного зниження витрат енергії на опалення протягом усього життєвого циклу будівлі.

Висновки до розділу

1. Проаналізовано вплив товщини теплоізоляційного шару на теплозахисні характеристики зовнішніх стін будівель. Встановлено, що збільшення товщини утеплювача забезпечує суттєве зменшення тепловтрат через огорожувальні конструкції та зниження питомого споживання теплової енергії на опалення.
2. Показано, що для кліматичних умов України при використанні поширених теплоізоляційних матеріалів (мінеральної вати та пінополістиролу) оптимальна товщина теплоізоляційного шару становить 100–150 мм, що забезпечує виконання нормативних вимог до теплозахисту будівель.

3. Встановлено, що подальше збільшення товщини теплоізоляції дозволяє підвищити рівень енергоефективності будівель, однак потребує техніко-економічного обґрунтування з урахуванням вартості матеріалів та енергоносіїв.
4. Проаналізовано економічну ефективність термомодернізації та встановлено, що застосування теплоізоляційних матеріалів дозволяє зменшити тепловтрати на 40–60 %, а строк окупності заходів становить у середньому 5–10 років залежно від характеристик будівлі та умов експлуатації.
5. Визначено, що економічна доцільність термомодернізації визначається співвідношенням початкових витрат на утеплення та економії енергоресурсів у процесі експлуатації будівлі.
6. Показано, що раціональний вибір типу теплоізоляційного матеріалу та оптимальної товщини теплоізоляційного шару забезпечує необхідний рівень теплозахисту, зменшення експлуатаційних витрат на опалення та підвищення загальної енергоефективності будівель.
7. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні нових енергоефективних будівель, а також під час термомодернізації існуючих об'єктів для обґрунтування вибору матеріалів і конструктивних рішень утеплення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання дослідження процесів теплоперенесення через теплоізовані стінові огорожувальні конструкції будівель з урахуванням зміни теплофізичних характеристик теплоізоляційних матеріалів у процесі їх експлуатації.

1. Встановлено, що значна частина тепловтрат будівель припадає на зовнішні огорожувальні конструкції, зокрема стіни. Підвищення енергоефективності будівель потребує застосування ефективних теплоізоляційних матеріалів та оптимізації конструктивних рішень огорожувальних конструкцій.
2. Проаналізовано механізми теплопередачі через багат шарові стінові конструкції та встановлено, що на теплотехнічні характеристики огорожувальних елементів значний вплив мають вологість матеріалів, температурні коливання, інсоляція та експлуатаційні фактори.
3. Розроблено математичну модель тепломасопереносу у капілярно-пористих будівельних матеріалах, яка враховує процеси теплопровідності, дифузії водяної пари та переносу рідкої вологи. На основі цієї моделі виконано чисельне моделювання температурно-вологісного стану огорожувальних конструкцій.
4. Проведено експериментально-розрахункові дослідження теплофізичних характеристик теплоізоляційних матеріалів у процесі експлуатації. Показано, що для більшості досліджуваних матеріалів відбувається поступове збільшення коефіцієнта теплопровідності, що свідчить про процес їх природного старіння. Дослідження підтвердило, що теплоізоляційні матеріали з часом зазнають змін своїх теплофізичних характеристик, що впливає на їх ефективність. Найбільш суттєві зміни коефіцієнта теплопровідності спостерігаються для екструдованого пінополістиролу та деяких полімерних матеріалів. На основі отриманих експериментально-розрахункових значень коефіцієнтів теплопровідності виконано розрахунок опору теплопередачі утеплених стінових конструкцій з використанням різних теплоізоляційних

матеріалів. Встановлено, що лише окремі матеріали забезпечують нормативний рівень термічного опору огорожувальних конструкцій.

5. Встановлено, що зміна теплофізичних характеристик теплоізоляційних матеріалів має нелінійний характер та залежить від ряду факторів, зокрема впливу вологи, механічних навантажень, температурних коливань та структурних змін пористої структури матеріалу.
6. Дослідження підтвердило, що теплоізоляційні матеріали з часом зазнають змін своїх теплофізичних характеристик, що впливає на їх ефективність. Найбільш суттєві зміни коефіцієнта теплопровідності спостерігаються для екструдованого пінополістиролу та деяких полімерних матеріалів.
7. Розроблено практичні рекомендації щодо вибору оптимальної товщини теплоізоляційного шару для зовнішніх стін будівель. Показано, що для кліматичних умов України оптимальна товщина утеплення при використанні поширених теплоізоляційних матеріалів становить приблизно 100–150 мм для енергоефективних будівель, а для будівель із підвищеним рівнем енергоефективності може досягати 200–300 мм.
8. Проведено оцінку економічної ефективності утеплення огорожувальних конструкцій. Показано, що застосування теплоізоляції дозволяє знизити тепловтрати будівель на 40–60 % та забезпечити економію витрат енергії на опалення. Орієнтовний строк окупності заходів з термомодернізації залежно від характеристик будівлі та вартості енергоносіїв становить 5–10 років.
9. Таким чином, результати проведених досліджень підтверджують доцільність застосування сучасних теплоізоляційних матеріалів та оптимізації конструкцій огорожувальних елементів для підвищення енергоефективності будівель. Отримані результати можуть бути використані під час проектування нових енергоефективних будівель, а також при реконструкції та термомодернізації існуючого житлового фонду.
10. На основі отриманих результатів визначено подальші напрями досліджень у сфері підвищення енергоефективності будівель:

- вивчення поєднання різних матеріалів та технологій для підвищення теплозахисту;
- дослідження впливу кліматичних змін на довговічність теплоізоляції та стійкість конструкцій до екстремальних погодних умов;
- впровадження використання інноваційних матеріалів у будівельну галузь;
- аналіз впливу різних теплоізоляційних технологій на довкілля, включаючи можливість переробки та повторного використання матеріалів.

11. Реалізація цих напрямів досліджень сприятиме подальшому вдосконаленню будівельних технологій, підвищенню рівня комфорту та скороченню споживання енергоресурсів у будівлях майбутнього.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Директива 2010/31/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 19 травня 2010 р. «Про енергетичну ефективність будівель» // Офіційний журнал Європейського Союзу. – 2010. – L 153. – С. 13–35. –
2. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.07.2017 № 2118-VIII // Верховна Рада України.
3. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. – Київ: Мінрегіон України, 2016.
4. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. – Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2022.
5. Концепція державної цільової економічної програми з енергоефективності та розвитку відновлюваних джерел енергії на 2021–2025 роки. – Київ, 2021.
6. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. – Київ: Мінрегіон України, 2013.
7. Житловий фонд України: статистичний збірник. – Київ: Державна служба статистики України, 2019. – 90 с. – Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua>
8. Саницький М. А., Позняк О. Р., Бідник І. В. та ін. Аналіз міжнародного та вітчизняного досвіду використання енергозберігаючих технологій у галузі будівництва. – Львів, 2008. – 134 с.
9. ДСТУ-Н Б В.1-27:2010. Будівельна кліматологія. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2010.
10. ДСТУ Б EN 15251:2011. Внутрішні параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель. – Київ: Мінрегіон України, 2011.
11. ДСТУ Б EN ISO 7730:2011. Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту. – Київ: Мінрегіон України, 2011.
12. ДСТУ Б В.2.6-189:2013. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель.

13. EN 12831. Energy performance of buildings – Method for calculation of the design heat load. – Brussels: CEN, 2017.
14. ДБН В.1.2-11:2021. Основні вимоги до будівель і споруд. Енергозбереження. – Київ: Мінрегіон України, 2021.
15. Савицький М. В., Швець М. А., Юрченко Є. Л., Шляхов К. В. Основні принципи методики раціонального проектування житлових будівель // Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону. – 2005. – Вип. 62, кн. 2. – С. 292–295.
16. Про енергозбереження: Закон України від 01.07.1994 № 74/94-ВР // Верховна Рада України.
17. Саницький М. А., Позняк О. Р., Марущак У. Д. Енергозберігаючі технології в будівництві: навч. посіб. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 236 с.
18. Пахолюк О. А., Задорожнікова І. В., Пасічник Р. В. Порівняння енергоефективності теплоізоляційних матеріалів // Комунальне господарство міст. – 2012. – № 103. – С. 110–114.
19. Хоменко В. П., Фаренюк Г. Г. Справочник по теплозащите зданий. – Київ: Будівельник, 1986. – 216 с.
20. Ковальський В. П., Щербань Д. П. Енергозбереження при реконструкції житлової секції застарілої серії // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2013. – № 2. – С. 116–118.
21. Чернуха Д. В., Воїнов Д. В. Особливості функціонування будівельних споруд з утепленими огорожуючими конструкціями // Труды Одесского политехнического университета. – 2005. – Вип. 2 (24). – С. 101–104.
22. Пашинський В. А., Плотніков О. А. Експериментальні дослідження теплового режиму стін житлових будинків // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – 2013. – Вип. 27. – С. 360–366.
23. Фонд енергетичної ефективності України. – Режим доступу: <https://eefund.org.ua/>

24. Liu Y., Wang X., Zhou S., Chen H. Enhancing public building energy efficiency using the response surface method: An optimal design approach // Environmental Impact Assessment Review. – 2021. – Vol. 87. – 106548.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106548>
25. Дудла І. О., Голодюк Г. І., Гургула Н. М. Дослідження теплоізоляційних матеріалів на основі рослинної сировини // Товарознавчий вісник. – 2022. – Вип. 15. – С. 176–183. – Режим доступу:
<http://tovvisnik.lutsk-ntu.com.ua/index.php/tovvisnik/article/view/209/180>
26. Latif E., Bevan R., Woolley T. Thermal insulation materials for building applications. – 2019. – 208 p. – Режим доступу:
<https://www.icevirtuallibrary.com/isbn/9780727763518>
27. Adl-Zarrabi B., Johansson P. Long-term performance of super-insulating materials in building components & systems. – International Energy Agency, 2020. – 101 p. – Режим доступу:
https://www.ieaebc.org/Data/publications/EBC_Annex_65_Subtask_3.pdf
28. Johansson P., Wahlgren P. Interior insulation using super insulation materials: saving energy and space // Department of Architecture and Civil Engineering, Chalmers University of Technology. – 2017. – DOI: 10.1088/1755-1315/588/5/052017
29. НКРЕКП. Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua>
30. Гембара Н. О. Математичне моделювання теплопровідності пластин і оболонки з багатошаровими покриттями : дис. канд. техн. наук. – Львів, 2014.
31. Нагорний М. В. Ефективні енергозберігаючі конструкції малоповерхових житлових будинків: дис. канд. техн. наук. – Харків, 2001.
32. Філоненко О. І., Юрін О. І. Будівельна теплофізика огорожувальних конструкцій будівель. – Полтава: ПолтНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2015. – 328 с.
33. Чернявський В. В., Борисенко О. Б. Кліматичні фактори впливу на теплоізоляційні фасадні системи // Містобудування та територіальне планування. – 2010. – № 37. – С. 559–564.

34. Білявський Г. О., Фурдуй Р. С., Костіков І. Ю. Основи екології. – Київ: Либідь, 2005. – 408 с.
35. Чернявський В. В., Борисенко О. Б. Кліматичні фактори впливу на теплоізоляційні фасадні системи з тонким штукатурним шаром // Містобудування та територіальне планування. – 2010. – № 37. – С. 559–564.
36. Кривенко П. В., Пушкарьова Е. К., Барановський В. Б. та ін. Будівельне матеріалознавство. – Київ: Либідь, 2012. – 245 с.
37. Пушкарьова К. К. Сучасні українські будівельні матеріали, виробы та конструкції. – Київ: Асоціація «ВСВБМВ», 2012. – 664 с.
38. Сучасні теплоізоляційні матеріали. – Режим доступу:
<http://www.termolife.com.ua/pages/89/>
39. Фомин С. Л., Фурсов Ю. В. Особенности конструирования дополнительной теплозащиты фасадных конструкций // Науковий вісник будівництва. – 2007. – Вип. 41. – С. 290–294.
40. Кулінченко В. Р. Теплопередача з елементами масообміну (теорія і практика процесу). – Київ: Фенікс, 2014. – 917 с.
41. Пашинський В. А., Фаренюк Г. Г. Оцінка імовірності виникнення теплових відмов конструкцій // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2010. – Вип. 56. – С. 305–310.
42. Пашинський В. А., Пушкар Н. В., Карюк А. М. Температурні впливи на огорожувальні конструкції будівель. – Одеса: ОДАБА, 2012. – 180 с.
43. Пашинський В. А., Плотніков О. А., Карюк А. М. Методика оцінювання теплової надійності стін за критерієм тепловитрат // Наукові нотатки. – 2014. – Вип. 45. – С. 417–423.
44. Пашинський В. А., Карпушин С. О., Пашинський М. В. Методика визначення кліматичних навантажень // Вісник ОДАБА. – 2018. – № 71. – С. 68–72.
45. Eromobor S. O., Das D. K., Emuze F. Influence of building and indoor environmental parameters on designing energy-efficient buildings // International Journal of Building Pathology and Adaptation. – 2020.

46. Amin M., Carlucci S., Causone F., Pagliano L. Energy retrofit of a day care center for current and future weather scenarios // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 145. – P. 1330–1337.
47. Юрін О. І. Експериментальні дослідження впливу температури в повітряному прошарку на швидкість зменшення вологості утеплювача // *Збірник наукових праць ПолтНТУ ім. Ю. Кондратюка*. – 2013. – № 1(1). – С. 216–225.
48. Юрін О. І., Семко О. В. Вплив взаємного розташування зовнішнього кута будинку та віконного прорізу на температуру внутрішньої поверхні кута // *Збірник наукових праць ПолтНТУ ім. Ю. Кондратюка*. – 2013. – № 4(2). – С. 182–190.
49. Aguilar F., Solano J. P., Vicente P. G. Transient modeling of high-inertial thermal bridges in buildings using the equivalent thermal wall method // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – Vol. 67. – P. 370–377.
50. Berggren B., Wall M. Calculation of thermal bridges in (Nordic) building envelopes – risk of performance failure due to inconsistent use of methodology // *Energy and Buildings*. – 2013. – Vol. 65. – P. 331–339.
51. Berggren B., Wall M. Calculation of thermal bridges in (Nordic) building envelopes – risk of performance failure due to inconsistent use of methodology // *Energy and Buildings*. – 2013. – Vol. 65. – P. 331–339.
52. Ascione F., Bianco N., De Rossi F., Turni G., Vanoli G. P. Different methods for the modelling of thermal bridges into energy simulation programs // *Applied Energy*. – 2012. – Vol. 97. – P. 405–418.
53. Cappelletti F., Gasparella A., Romagnoni P., Baggio P. Analysis of the influence of installation thermal bridges on windows performance // *Energy and Buildings*. – 2011. – Vol. 43. – № 6. – P. 1435–1442.
54. Baker P. H., Galbraith G. H. Temperature gradient effects on moisture transport in porous building materials // *Building Services Engineering*. – 2009. – Vol. 30, № 1. – P. 37–48.

55. Prata J., Simões N., Tadeu A. Heat transfer measurements of a linear thermal bridge in a wooden building corner // *Energy and Buildings*. – 2018. – Vol. 158. – P. 194–208.
56. Фаренюк Г. Г., Тишковець А. В. Світові тенденції підвищення енергоефективності // *Наука та будівництво*. – 2017. – № 4. – С. 4–10.
57. Фаренюк Г. Г., Федевич О. М. Науково-методичні напрями // *Будівельні конструкції*. – 2013. – № 77. – С. 10–14.
58. Фаренюк Г. Г. Методи експериментального визначення // *Будівельні матеріали*. – 2010. – № 36. – С. 76–83.
59. Jaber S., Ajib S. Optimum, technical and energy efficiency design of residential building in Mediterranean region // *Energy and Buildings*. – 2011. – Vol. 43. – P. 1829–1834.
60. Soudian S., Berardi U. Development of a performance-based design framework for multifunctional climate-responsive façades // *Energy and Buildings*. – 2021. – Vol. 231. – 110589.
61. Nienhuys S. Calculation examples of thermal insulation. – 2012. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/232613788>
62. Aldawoud A. The influence of the atrium geometry on the building energy performance // *Energy and Buildings*. – 2013. – Vol. 57. – P. 1–5.
63. Bambrook S. M., Sproul A. B., Jacob D. Design optimisation for a low energy home in Sydney // *Energy and Buildings*. – 2011. – Vol. 43. – P. 1702–1711.
64. DeKay M., Brown G. Z. Sun, wind and light: Architectural design strategies. – 3rd ed. – Wiley, 2014. – 432 p.
65. Ратушняк Г. С., Попова Г. С. Будівельна теплофізика. – Вінниця: ВНТУ, 2004. – 119 с.
66. Басок Б. І., Накорчевський А. І. Моделирование теплопередачи через наружное ограждение зданий // *Строительные конструкции*. – 2014. – Вып. 80. – С. 113–120.

- 67.Долінський А. А., Басок Б. І. Створення експериментального енергоефективного будинку пасивного типу // Праці науково-практичної конференції. – Київ, 2014. – С. 26–30.
- 68.Гончарук С. М., Калініна М. Ф., Божко І. К., Кужель Л. М., Лисенко О. М. Створення експериментального енергоефективного будинку пасивного типу «нуль енергії» // Промислова теплотехніка. – 2014. – Т. 36, № 3. – С. 88–95.
- 69.Степаненко О. І., Дубровська В. В. Пасивний будинок – шлях до ефективного використання енергії // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – № 3. – С. 56–58.
- 70.Омельченко Н. В., Браїлко А. С. Переваги та недоліки сучасних теплоізоляційних матеріалів.
- 71.Волощук В. А. Оптимізація теплозахисту огорожувальних конструкцій при поелементному підході // Енергоефективність в будівництві та архітектурі. – 2013. – Вип. 4. – С. 47–51.
- 72.Волощук В. А. Математична модель оптимізації об'ємно-планувальних рішень будівель // Енергоефективність в будівництві та архітектурі. – 2013. – Вип. 5. – С. 15–18.
- 73.Hjul J., Kjemtrup I. M., Lauridsen T. B. Wind conditions around high-rise buildings: master thesis. – Aalborg University, 2010. – 152 p.
- 74.Stangroom P. CFD modeling of wind flow over terrain: PhD thesis. – University of Nottingham, 2004. – 298 p.
- 75.Crasto G. Numerical simulations of the atmospheric boundary layer. – Режим доступу:
http://www.windsim.com/documentation/papers_presentations/thesis/0702_Giorgio_Crasto.pdf
- 76.Hillewaere J., Degroote J., Lombaert G., Vierendeels J., Degrande G. CFD prediction of aerodynamic pressures on silo surfaces // ECCOMAS. – 2012.
- 77.Wieringa J., Davenport A. G., Grimond B., Oke T. R. New revision of Davenport roughness classification // Conference proceedings. – 2001.

78. Hargreaves D. M., Wright N. G. On the use of the $k-\epsilon$ model in CFD software // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2007. – Vol. 95. – P. 355–369.
79. Fallo D. Wind energy resource evaluation by CFD simulations. – 2007.
80. Yang Y., Gu M., Jin X. New inflow boundary conditions for modeling atmospheric boundary layer // *Conference proceedings*. – 2009.
81. Hjul J., Kjemtrup I. M., Lauridsen T. B. Wind conditions around high-rise buildings. – 2010.
82. Franke J., Hellsten A., Schlunzen H., Carissimo B. practice guideline for CFD simulation of flows in the urban environment. – 2007.
83. Loveday D. L., Taki A. H. Convective heat transfer coefficient at a plane surface // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1996. – Vol. 39, № 8. – P. 1729–1742.
84. Blocken B., Defraeye T., Derome D., Carmeliet J. High-resolution CFD simulations for convective heat transfer // *Building and Environment*. – 2009. – Vol. 44. – P. 2396–2412.
85. Mochida A. та иН. Comparison of $k-\epsilon$ model and DSM // *Wind and Structures*. – 2002. – Vol. 5. – P. 227–244.
86. Lienhard J. H., Lienhard J. H. A heat transfer textbook. – 3rd ed. – Cambridge: Phlogiston Press, 2006.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧКИ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Basok B., Pavlenko A., Novikov V., Koshlak H., Ciosek A., Moroz M. Comprehensive Investigation of the Thermal Performance of an Electrically Heated Double-Glazed Window: A Theoretical and Experimental Approach. *Energies*. 2024. Vol. 17 (17). DOI: <https://doi.org/10.3390/en17174491> [іноземне видання; **Scopus Q1**] (*Внесок здобувача: участь у проведенні огляду та аналізу літературних джерел, постановці завдань дослідження*).

2. Boris Basok, Anatoliy Pavlenko, Oleksandr Nedbailo, Ihor Bozhko, Maryna Moroz A Two-dimensional Numerical Model of Heat Exchange in the Soil Massif During the Operation of a Shallow Horizontal Soil Heat Exchanger. *Rocznik Ochrona Środowiska*, Volume 25, 2023. pp. 274 – 281. DOI: 10.54740/ros.2023.029 [іноземне видання; **Scopus Q3**] (*Внесок здобувача: участь у проведенні огляду та аналізу літературних джерел, постановці завдань дослідження*).

3. Basok, B., Dubovsky, S., Pastushenko, E., Moroz, M., & Veremiichuk, H. (2023). ACTIVE UTILIZATION OF THE HEAT OF THE FLUE GASES OF THE BIOFUEL BOILER. *Energy Technologies & Resource Saving*, 77(4), 67-80. <https://doi.org/10.33070/etars.4.2023.06> [вітчизняне фахове видання; **категорія «А»**, **Scopus Q4**] (*Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних*).

4. Borys Basok, Svitlana Goncharuk, Maryna Moroz, Hanna Veremiichuk. EXPERIMENTAL RESEARCH OF HEAT TRANSFER THROUGH HEAT-INSULATED WALL ENCLOSURE STRUCTURES. *Journal of new technologies in environmental science*. № 3. Vol. 7. 2023. P. 77-82. Doi: 10.53412/jntes-2023-3-1 [іноземне видання]. (*Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації*).

5. Basok, M. Novitska, S. Goncharuk, M. Moroz, A. Timoshenko. Experimental passive house of the institute of engineering thermophysics//Proceedings of IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems. April 17-19. 2019. Kyiv, Ukraine.

P.108-111. [іноземне видання; **Scopus**]. (*Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації*)

6. Basok B., Davydenko B., Lysenko O., Goncharuk S., Veremiichuk Yu., Moroz M. Intelligent management of the building's heat consumption when using individual heat points. 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems. [іноземне видання; **Scopus**] (*Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації*).

7. Тимощенко А.В., Беляєва Т.Г., Стецюк В.Г., Сороковий Р.Я., Мороз М.В. (2018). Конвективна сушка теплоізоляційних базальто-бентонітових виробів. Енергетика: економіка, технології, екологія, (3), с. 103-110. [вітчизняне фахове видання; **категорія «Б»**] (*Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації*).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Basok B., Goncharuk S., Opryshko V., Lysenko O., Bospala N. Moroz M. Experimental determination of thermal parameters of an electric heater. IEEE 9th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). October 29-31. 2024.

9. Мороз М.В., Басок Б.І. Експериментальні дослідження температурного стану приміщення при різних варіантах термоізоляційних фасадних матеріалів. – Енергетика. Екологія. Людина. Зб. наукових праць ІЕЕ, КПІ імені Ігоря Сікорського – Київ: ІЕЕ, 2020. – С.261-269.

10. Basok B., Davydenko D., Novikov V., Sorokoviy R., Moroz M., Timoshchenko A. Influence of Solar Radiation on the Temperature Regime of Buildings Walls. Technical University of Kosice. Civil Engineering faculty – ISBN 978-80-553-3238-3 – p. 100. – p.70-76 Cassotherm 2018.

11. Мороз М.В. Аналіз технологічних рішень утеплення фасадів будинків, Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: Збірка праць/Інститут промислової екології. – К.: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2021. С. 174-177.

12. Б.І. Басок, О.М. Лисенко, С.В. Андрейчук, М.П. Коваленко, В.П. Приємченко, М.В. Мороз. Економія витрат теплової енергії при експлуатації

індивідуального теплового пункту. Збірник праць «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики». Київ ІВЦ АЛКОН НАН України. 2022, С. 224-227.

13. Басок Б.І., Мороз М.В. «Застосування резервних генераторів для забезпечення безперервної роботи індивідуальних теплових пунктів: технічні аспекти та експлуатаційні вимоги». XIV Міжнародна онлайн-конференція «Проблеми теплофізики та теплоенергетики», 11-12 листопада 2025р.

14. Басок Б.І., Мороз М.В. «Організація аварійного (резервного) теплопостачання для закладів соціальної сфери міста Києва». V Міжнародна науково-практична конференція «Енергія. Ресурси. Екологія», 03-05 грудня 2025р.

15. Мороз М. В. Експериментальні дослідження температурного та вологісного стану приміщення при різних варіантах термоізоляційних матеріалів / М. В. Мороз, Б. І. Басок // Актуальні проблеми енергетики та екології: збірник наукових праць за матеріалами XVIII Всеукраїнської науково-технічної онлайн-конференції, Одеса, 29-30 вересня 2020 р./ ред. О. С. Тітлов. – Одеса : Бондаренко М. О., 2020. – С. 128–129.