

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**СЕРДЕЧНИЙ ПАВЛО ЮРІЙОВИЧ**

УДК: 697.1:699.86

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**Покращення енергетичних характеристик огорожувальних конструкцій  
будівель з урахуванням їх термічної неоднорідності**

**144 – Теплоенергетика**

**14 – Електрична інженерія**

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

\_\_\_\_\_ Павло СЕРДЕЧНИЙ

Науковий керівник: **Суходуб Ірина Олегівна**, кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2025

## АНОТАЦІЯ

*Сердечний П. Ю.* Покращення енергетичних характеристик огорожувальних конструкцій будівель з урахуванням їх термічної неоднорідності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 Теплоенергетика. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, м. Київ, 2025.

У вступі дисертації висвітлено актуальність теми дослідження на сьогоднішній день та зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Сформульовано мету, наукове завдання, об'єкт, предмет та методи дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, представлено дані про апробацію дисертації та наявні публікації з окресленням особистого внеску здобувача.

У першому розділі дисертаційного дослідження представлено ґрунтовний аналіз нормативних, методичних і наукових засад, що лежать в основі визначення енергоефективності будівель в Україні та країнах Європейського Союзу. Окрему увагу приділено законодавчій базі, зокрема Закону України «Про енергетичну ефективність будівель», який окреслює ключові принципи сертифікації, модернізації та підвищення енергоефективності будівель. Розглянуто відповідні європейські директиви, зокрема 2010/31/ЄС та оновлену 2024/1275/ЄС, які регламентують перехід до будівель з нульовими викидами, а також національні вимоги до класу енергоефективності, зокрема стандартів nZEB. У розділі наведено детальний аналіз теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій, зокрема мінімально допустимих значень опору теплопередачі для різних типів конструкцій згідно з ДБН В.2.6-31, ДСТУ 9191, а також з врахуванням міжнародних норм ASHRAE 90.1. Значну увагу зосереджено на методах розрахунку теплопередачі трансмісією, зокрема на формульному представленні компонентів лінійного та точкового впливу теплопровідних включень. Описано основні підходи

до обчислення теплових потоків через огороження, наведено ключові формули з нормативних стандартів, зокрема EN ISO 10211, а також надано роз'яснення щодо їх практичного застосування. Розкрито особливості застосування спрощених і детальних методів оцінки теплопровідних включень: від коригувальних поправок  $\Delta U_{tb}$ , рекомендованих для попередніх оцінок, до чисельного моделювання із застосуванням дво- та тривимірних моделей. Проаналізовано приклади використання стандартів класу A (EN ISO 10211) і класу B (EN ISO 14683) для розрахунку  $\psi$ - і  $\chi$ -коефіцієнтів. Підкреслено, що точне врахування теплопровідних включень є критично важливим для забезпечення високої енергоефективності оболонки будівлі та її сертифікації. У розділі також узагальнено результати актуальних вітчизняних і зарубіжних досліджень, що стосуються впливу теплових містків на рівень енергоефективності огорожувальних конструкцій. Представлено аналіз ефективності вузлових конструкцій, впливу матеріалів та геометрії, а також підходів до їх термомодернізації. Значну увагу приділено дослідженням з використанням чисельного моделювання в THERM, COMSOL, Agros2D, TRISCO та EnergyPlus, що підтверджує наукову актуальність проблеми.

Таким чином, розділ закладає науково-методологічне підґрунтя для подальшого дослідження впливу теплопровідних включень на показники енергоефективності будівель, обґрунтовуючи необхідність їх глибокого врахування при проєктуванні, оцінюванні та реновації будівельної оболонки.

У другому розділі дисертаційної роботи розглянуто характеристику двох типових представників будівельного фонду України – громадської будівлі (школи) та багатоквартирного житлового будинку. Обидва об'єкти були обрані як характерні приклади споруд, які потребують підвищення енергоефективності шляхом покращення теплоізоляції огорожувальних конструкцій і зниження втрат теплоти через теплопровідні включення. Для кожної будівлі подано розгорнутий опис конструктивних та інженерних характеристик, зокрема геометрії, матеріалів стін, покриттів, вікон і дверей, та ін. У межах розділу обґрунтовано необхідність використання спеціалізованого програмного забезпечення для точного визначення лінійних ( $\psi$ ) та точкових ( $\chi$ ) коефіцієнтів теплопередачі. Детально розглянуто

сучасні програмні продукти, включаючи THERM, Solido Physibel, HEAT2/HEAT3, Flixo Energy, Ansys/Fluent, які дозволяють з високою точністю моделювати теплофізичні процеси в конструкціях, аналізувати розподіл температурних полів, ризики конденсації та теплових втрат. У якості базового інструменту для подальших досліджень обрано програму THERM, що поєднує зручний графічний інтерфейс з потужним чисельним ядром, реалізованим за методом скінченних елементів.

Також наведено математичний апарат моделювання у THERM, включаючи рівняння теплопровідності, реалізацію методу зважених залишків, алгоритм побудови сітки Finite Quadtree та формулювання граничних умов. Пояснено, яким чином реалізовано розв’язання задачі теплопередачі для неоднорідних конструкцій у двовимірному просторі.

Крім того, в розділі охарактеризовано програмне забезпечення для динамічного енергетичного моделювання будівель, серед якого виділено DesignBuilder (на базі EnergyPlus), IDA ICE, IES VE, eQuest, DOE-2. Детально описано підходи до розрахунку теплових балансів у EnergyPlus, зокрема функцію передавання теплопровідності (CTF), внутрішній і зовнішній теплові баланси поверхонь, вікон, повітря зони. Ці підходи слугуватимуть основою для оцінювання впливу теплопровідних включень на енергопотребу будівлі в подальших розділах. Таким чином, другий розділ формує інженерно-аналітичне підґрунтя для подальших практичних розрахунків, забезпечуючи повну інформацію про об’єкти дослідження та обґрунтовану методологію їх моделювання.

У третьому розділі дисертаційного дослідження здійснено чисельне моделювання теплових потоків у вузлах термічно неоднорідних огорожувальних конструкцій з метою визначення їх енергетичної ефективності та впливу на загальні тепловтрати будівлі. Враховуючи актуальність переходу до проєктування та зведення будівель з близьким до нульового рівня енергоспоживання (nZEB), у розділі обґрунтовано необхідність покращення існуючих підходів до проєктування будівельних вузлів, що традиційно представлені у національних нормах та каталогах.



Було проаналізовано найтипівіші вузли, характерні для будівельної практики в Україні, зокрема: примикання зовнішніх стін до міжповерхових перекриттів, до балконних плит, кутові стики стін, примикання до плити перекриття даху та парапету, вузли підлоги над неопалюваним підвалом, вузли у зоні віконних перемичок, підвіконь і рядових сполучень. Для кожного з них виконано побудову 2D-моделі в програмному середовищі THERM, з подальшим чисельним розрахунком температурного поля, розподілу густини теплового потоку, а також визначенням величини лінійного коефіцієнта теплопередачі  $\psi$ .

У межах розділу наведено базові та покращені конструктивні рішення для кожного вузла, обґрунтовано їх ефективність через порівняння відповідних значень  $\psi$ -фактора, які часто зменшувались на 30–70 % за рахунок застосування додаткових теплоізоляційних матеріалів, виносного монтажу вікон, терморозривів тощо. У підсумку, розділ закладає основу для кількісної оцінки впливу теплопровідних включень на рівень енергопотреб на опалення та охолодження будівель. Наведений підхід може бути інтегрований у сучасну проєктну практику та використаний для адаптації існуючих будівель під стандарти nZEB.

У четвертому розділі представлено комплексне дослідження впливу теплопровідних включень на енергетичну ефективність будівель шляхом використання динамічного моделювання в середовищі DesignBuilder на базі енергетичного ядра EnergyPlus. Основною метою стало кількісне оцінювання зміни річної енергопотреб на опалення та охолодження в залежності від ступеня врахування теплопровідних включень.

Для реалізації поставлених задач були розроблені сім сценаріїв моделювання, що відрізнялися рівнем деталізації та підходами до врахування теплових містків: від ідеалізованих умов без врахування теплопровідних включень — до найбільш деталізованого nZEB-сценарію. Ці сценарії застосовувалися для двох типових об'єктів: будівлі навчального закладу (громадської будівлі) та багатоквартирного житлового будинку. Проведено повноцінне створення енергетичних моделей із урахуванням кліматичних даних (IWEC), параметрів огорожувальних конструкцій, сценаріїв експлуатації, внутрішніх надходжень теплоти,

вентиляційного повітрообміну та характеристик інженерних систем. З метою об'єктивного порівняння застосовано метод енергетичного моделювання, що дозволяє ізолювати вплив виключно огорожувальної оболонки, не враховуючи ККД обладнання.

Результати моделювання показали, що теплопровідні включення істотно впливають на опалювальне навантаження. У базовому сценарії значні втрати теплової енергії через неякісні вузли спричиняють високі показники річної енергопотреби. Застосування конструктивних покращень дозволяє знизити енергопотребу на опалення до 25–30%, а повна відповідність nZEB-рівню — ще додатково зменшує споживання. Однак у літній період у nZEB-сценаріях виявляється збільшене охолоджувальне навантаження (до +25%), що пов'язано з ефектом перегріву через надмірну теплоізоляцію. Це вказує на потребу балансування теплоізоляційних характеристик і ефективного літнього клімат-контролю.

Також у розділі проведено аналіз оперативних температур для візуалізації впливу теплопровідних включень на комфорт в приміщеннях.

**Ключові слова:** модель, аналітична модель, математичне моделювання, числове моделювання, метод скінченних елементів, енергія, енергоефективність, енергетичне моделювання, динамічне моделювання будівель, енергоспоживання, огорожувальні конструкції, тепловий комфорт, теплопровідні включення, температура, nZEB.

## ABSTRACT

*Serdechnyi P.Y.* Improvement of the energy performance of building envelope structures considering thermal bridges effect.

Thesis for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 144 Thermal Power Engineering. - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2025.

The introduction of the dissertation outlines the relevance of the research topic at the present time and its connection to scientific programs, plans, and themes. The purpose, scientific objectives, object, subject, and research methods are formulated. The scientific novelty and practical significance of the obtained results are defined. Information is provided regarding the dissertation's approbation and existing publications, with a clear indication of the author's personal contribution.

The first chapter of the dissertation presents a comprehensive analysis of the regulatory, methodological, and scientific foundations that underlie the assessment of building energy efficiency in Ukraine and the European Union. Special attention is paid to the legislative framework, in particular the Law of Ukraine "On Energy Efficiency of Buildings", which outlines the key principles of certification, modernization, and improvement of energy performance. Relevant European directives, including 2010/31/EU and the updated 2024/1275/EU, are reviewed, as they regulate the transition to zero-emission buildings and define national energy performance requirements, particularly the nearly Zero-Energy Building (nZEB) standards.

The chapter provides an in-depth analysis of the thermal performance of building envelopes, including minimum allowable thermal resistance values for different envelope elements according to national standards (DBN V.2.6-31, DSTU 9191) and international regulations such as ASHRAE 90.1. Emphasis is placed on methods for calculating heat transmission, especially the mathematical representation of linear and point thermal bridging effects. Key calculation approaches and formulas from standards such as EN ISO 10211 are explained and contextualized for practical application.

The chapter further explores both simplified and detailed methods for evaluating thermal bridges—from correction factors ( $\Delta U_{tb}$ ) for preliminary estimates to detailed 2D and 3D numerical modeling. Applications of Class A (EN ISO 10211) and Class B (EN ISO 14683) methods for calculating linear ( $\psi$ ) and point ( $\chi$ ) thermal transmittance values are discussed. The importance of accurately accounting for thermal bridges is highlighted as essential for achieving high energy efficiency and successful energy certification.

Additionally, the chapter synthesizes findings from national and international research related to the impact of thermal bridging on building envelope performance. It includes analysis of joint details, material influence, and geometry, as well as strategies for thermal modernization. Particular attention is given to numerical modeling tools such as THERM, COMSOL, Agros2D, TRISCO, and EnergyPlus, affirming the scientific relevance of the topic.

Thus, this chapter lays the scientific and methodological foundation for further investigation of thermal bridges and their influence on overall building energy performance, justifying the need for their detailed consideration in building design, evaluation, and retrofit processes.

The second chapter characterizes two typical representatives of the Ukrainian building stock—a public building (school) and a multi-apartment residential building. These buildings were selected as representative examples requiring improved thermal protection and reduced heat loss through thermal bridges. A detailed overview is provided for each building, including geometry, structural components, and engineering systems such as walls, roof slabs, windows, and doors.

The chapter substantiates the need to use specialized software tools for accurately determining linear ( $\psi$ ) and point ( $\chi$ ) thermal transmittance coefficients. State-of-the-art simulation tools are reviewed, including THERM, Solido Physibel, HEAT2/HEAT3, Flixo Energy, and Ansys Fluent, which are capable of high-precision modeling of thermophysical processes, temperature distribution, condensation risks, and heat losses in building assemblies. THERM was chosen as the primary tool for further study due to its user-friendly interface and robust finite element solver.

The mathematical modeling framework used in THERM is presented, including the heat conduction equation, weighted residuals method, Finite Quadtree mesh generation, and boundary condition formulation. The implementation of 2D steady-state heat transfer simulation for inhomogeneous assemblies is also described.

Additionally, the chapter addresses dynamic building energy modeling tools such as DesignBuilder (based on EnergyPlus), IDA ICE, IES VE, eQuest, and DOE-2. A detailed explanation is provided for EnergyPlus's heat balance algorithms, including the conduction transfer function (CTF), surface heat balances, window heat exchange, and zone air heat dynamics. These methods form the basis for assessing the impact of thermal bridges on overall building energy demand in later chapters. In conclusion, Chapter 2 provides the engineering and analytical basis for subsequent calculations and ensures comprehensive coverage of the building models and methodologies used.

The third chapter of the dissertation presents extensive numerical modeling of thermal flows in thermally inhomogeneous building envelope junctions to assess their energy performance and contribution to total heat losses. Given the growing importance of nZEB design, the need to revise traditional junction solutions from national norms and catalogues is justified. The most common thermal bridge-prone junctions found in Ukrainian buildings are analyzed, including external wall connections to floor slabs, balconies, roof parapets, corner joints, unheated basement floors, and window-to-wall joints (at sills, heads, and jambs). Each junction was modeled in THERM using 2D geometry, with simulation outputs including temperature field distribution, heat flux vectors, and calculated linear thermal transmittance ( $\psi$ -values).

For each case, both baseline and improved designs are presented, with comparisons demonstrating reductions in  $\psi$ -values by 30–70% due to added insulation, thermal breaks, or adjusted installation positions. In some cases (e.g., balcony slabs), baseline  $\psi$ -values exceeded  $0.7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , highlighting their critical contribution to heat loss. This chapter builds a quantitative basis for further analysis of how thermal bridges affect annual heating and cooling energy needs. The modeling methodology and results are suitable for direct application in nZEB-aligned design workflows and for the energy modernization of existing buildings.

Chapter four presents a comprehensive energy analysis using dynamic simulations in DesignBuilder (powered by EnergyPlus) to evaluate the impact of thermal bridges on building energy performance. The primary goal was to quantify the influence of including thermal bridges on annual heating and cooling energy demand.

Seven simulation scenarios were developed, each varying by the level of detail used to account for thermal bridges—from idealized cases (no thermal bridges) to highly detailed nZEB-compliant designs. These scenarios were applied to two typical building models: a school and a multi-apartment residential building.

Complete energy models were constructed using IWECC climate data, envelope configurations, occupancy patterns, internal gains, ventilation parameters, and HVAC assumptions. The simulations isolated the effect of the envelope by excluding system efficiencies, ensuring objective comparison across cases.

Results confirmed that thermal bridges significantly increase heating demand. In the baseline cases, poorly detailed joints contributed to elevated annual energy needs. Introducing improved junctions lowered heating energy demand by up to 25–30%, with nZEB-level compliance further enhancing savings. However, during the summer period, nZEB models exhibited increased cooling loads (up to +25%) due to overheating risks associated with excessive insulation, emphasizing the need for proper solar shading and ventilation design.

The chapter also includes operative temperature analysis, visualizing indoor comfort shifts across scenarios and confirming that enhanced insulation contributes to greater temperature stability in winter, though may require cooling support in summer.

**Keywords:** model, analytical model, mathematical modeling, numerical modeling, finite element method, energy, energy efficiency, energy modeling, dynamic building modeling, energy consumption, building envelope, thermal comfort, thermally conductive inclusions, temperature, nZEB.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дешко В. І., Суходуб І. О., Сердечний П. Ю. Використання енергетичного моделювання будівель при розробці проектів з підвищення енергоефективності // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. – 2019. – № 4 (136). – С. 86–96.. <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2019.4.9> **(фахове видання)**
2. Дешко В. І., Білоус І. Ю., Голубенко О. О., Сердечний П. Ю., Яркова Н. А. Оцінювання енергоефективності школи з врахуванням локальних відновлювальних джерел енергії // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2024. – № 1. – С. 83–98.. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2024.1.08> **(фахове видання)**
3. І. О. Суходуб, П. Ю. Сердечний. Аналіз сценаріїв підвищення рівня енергетичної ефективності громадських будівель з інтеграцією ВДЕ [Текст] / Технології та інжиніринг. - 2024. - № 2 (19). - С. 44-56. <http://dx.doi.org/10.30857/2786-5371.2024.2.5> **(фахове видання)**
4. Суходуб І. О., Шкляр В. І., Дубровська В. В., Яценко О. І., Сердечний П. Ю. Оцінка енергетичної ефективності систем теплопостачання житлової будівлі з тепловими насосами на базі комп'ютерного моделювання // Енергетика і автоматика. – 2024. – № 0(1). – С. 142–156. [http://dx.doi.org/10.31548/energiya1\(71\).2024.142](http://dx.doi.org/10.31548/energiya1(71).2024.142) **(фахове видання)**
5. Суходуб І. О., Сердечний П. Ю. Аналіз впливу термічно неоднорідних огорожувальних конструкцій на енергетичні показники громадської будівлі // Енергетика і автоматика. – 2024. – № 0(4). – С. 156–170. [http://dx.doi.org/10.31548/energiya4\(74\).2024.156](http://dx.doi.org/10.31548/energiya4(74).2024.156) **(фахове видання)**
6. Сердечний П. Ю. Аналіз систем зеленої сертифікації будівлі з точки зору оцінки енергетичної ефективності // Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина», 7–8 травня 2020 р., м. Київ. –: ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С. 226-234.

7. Сердечний П. Ю. Аналіз впливу термічно неоднорідних огорожувальних конструкцій на енергетичні показники громадської будівлі // Аспірантські читання імені професора Артура Веніаміновича Праховника: збірник тез конференції (Київ, 9–10 квітня 2024 р.). – Київ: ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – С. 31-32.



## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ .....	2
ABSTRACT .....	7
СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	11
ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1 МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ ТА ЇХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	21
1.1 Нормативні засади енергоефективності будівель та їх огороджувальних конструкцій .....	21
1.2 Останні вітчизняні дослідження у сфері енергоефективності та оцінки теплопровідних включень у будівлях.....	33
1.3 Останні закордонні дослідження у сфері енергоефективності та оцінки теплопровідних включень у будівлях.....	37
Висновки до розділу 1 .....	44
РОЗДІЛ 2 ОБ'ЄКТИ МОДЕЛЮВАННЯ. МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЧИСЕЛЬНОГО АНАЛІЗУ ТЕПЛОПРОВІДНИХ ВКЛЮЧЕНЬ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	46
2.1 Загальні характеристики об'єктів енергетичного моделювання.....	46
2.1.1 Характеристики громадської будівлі навчального закладу .....	47
2.1.2 Характеристики житлової багатоквартирної будівлі .....	49
2.2 Основні програмні продукти для аналізу теплопровідних включень огороджувальних конструкцій .....	50
2.2.1 Основні параметри математичної моделі програмного середовища THERM .....	53
2.3 Особливості програмного забезпечення з енергетичного моделювання .....	55
2.3.1 Особливості математичного апарату EnergyPlus .....	58
Висновки до розділу 2 .....	62

РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ ТЕРМІЧНО НЕОДНОРІДНИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	64
3.1 Аналіз та оптимізація вузлів лінійних теплопровідних включень .....	64
3.1.1 Вузол примикання зовнішніх стін з цегли з опорядженням штукатуркою до міжповерхового перекриття .....	66
3.1.2 Вузол кутового сполучення зовнішніх стін з цегли з опорядженням штукатуркою .....	74
3.1.3 Вузол примикання плити перекриття плаского даху до стіни та парапету. ....	82
3.1.4 Вузол примикання зовнішніх стін з цегли з опорядженням штукатуркою до балконного перекриття .....	92
3.1.5 Вузол примикання віконної конструкції до зовнішніх стін.....	99
3.1.6 Вузол примикання плити перекриття підлоги над неопалюваним підвалом до стіни цоколя .....	121
3.1.7 Вузол примикання конструкції підлоги по ґрунту до зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією.....	130
Висновки до розділу 3 .....	140
РОЗДІЛ 4 ЕНЕРГЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОПОТРЕБИ НА ОПАЛЕННЯ ТА ОХОЛОДЖЕННЯ З ВРАХУВАННЯМ ТЕПЛОПРОВІДНИХ ВКЛЮЧЕНЬ.....	142
4.1 Енергетичне моделювання будівель.....	144
4.1.1 Енергетичне моделювання будівлі навчального закладу .....	148
4.1.2 Енергетичне моделювання будівлі багатоквартирного житлового будинку .....	157
Висновки до розділу 4 .....	164
ВИСНОВКИ.....	166
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	168
Додаток А .....	176
Додаток Б.....	178

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Американське товариство інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря);

EN – European Norms (Європейські норми);

ISO – International Organization for Standardization (Міжнародна організація зі стандартизації);

IWEC – International Weather for Energy Calculations (Міжнародні кліматичні дані для енергетичних розрахунків);

nZEB – nearly Zero-Energy Building (будівля з майже нульовим споживанням енергії);

ГВП – гаряче водопостачання;

ДБН – Державні будівельні норми;

ДСТУ – Державний стандарт України;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ОВК – опалення, вентиляція, кондиціонування;

ТВ – теплопровідне включення;

ОК – огорожувальна конструкція

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Питання забезпечення енергетичної ефективності будівель є одним із пріоритетів сталого розвитку сучасного суспільства. В умовах перш за все війни, зростання цін на енергоресурси, необхідності зниження викидів парникових газів і наближення до кліматичних цілей Європейського Союзу, підвищення рівня енергоефективності, зокрема ефективності огорожувальних конструкцій стає не лише технічним, а й стратегічним завданням. В Україні, згідно з національною політикою декарбонізації, з 2030 року планується запровадження обов'язкових вимог до нових будівель за принципами nZEB (будівель з майже нульовим споживанням енергії).

Одним із ключових факторів, що суттєво впливає на ефективність теплової оболонки, є теплопровідні включення – локальні ділянки в конструкціях, через які відбуваються непропорційно великі теплові втрати. Незважаючи на наявність відповідних нормативних документів, більшість існуючих підходів до проєктування та оцінювання конструкцій в Україні ґрунтуються на спрощених або застарілих схемах, що не дозволяють адекватно врахувати їх вплив на загальне енергоспоживання. Наявні в Україні каталоги типових вузлів не враховують різноманіття сучасних будівельних матеріалів, монтажних систем (зокрема віконних і фасадних), а також не охоплюють вимог для вискоефективних будівель. Більше того, у сфері сертифікації енергоефективності ще не врегульоване питання обов'язковості врахування лінійних коефіцієнтів теплопередачі, що може призводити до викривлення результатів енергетичних розрахунків. Саме теплопровідні включення у вузлах з'єднання стін, перекриття, підвалів та вікон часто стають причиною появи зон переохолодження, конденсації вологи та цвілі, що впливає не лише на споживання енергії, а й на мікроклімат і здоров'я мешканців.

У зв'язку з цим виникає потреба в глибокому дослідженні теплопровідних включень у типовій забудові, розробці удосконалених конструктивних рішень, а також у чисельному моделюванні їх впливу на енергетичні показники будівель. Застосування сучасних програмних засобів (THERM, DesignBuilder, EnergyPlus)

відкриває можливість для науково обґрунтованого підходу до оптимізації конструктивних рішень із врахуванням реального впливу термічної неоднорідності.

Отже, актуальність теми дисертаційного дослідження зумовлена необхідністю підвищення достовірності енергетичних розрахунків, вдосконалення методики оцінки теплопровідних включень та впровадження практичних рекомендацій для проектування енергоефективної оболонки будівель відповідно до сучасних нормативних вимог і стандартів nZEB.

Наукові роботи в області досліджень енергоефективності будівель та, зокрема огорожувальних конструкцій в більшості випадків обмежуються локальним аналізом або інженерних систем або точкового покращення теплотехнічних параметрів огорожувальних конструкцій. При цьому питання комплексної оцінки впливу теплопровідних включень на енергопотребу на опалення та охолодження будівель різного призначення потребує більшого дослідження. Цим направленням займалися такі науковці як Фаренюк Г.Г., Дешко В.І., Білоус І.Ю., Шовкалюк М.М., Г.С. Ратушняк, Zhang X, Kalle Kuusk, Hua Ge та Fuad Baba та ін.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є оцінювання впливу термічно неоднорідних елементів огорожувальних конструкцій будівель на енергетичні показники ефективності за допомогою математичного моделювання теплових потоків та динамічного енергетичного моделювання. Відповідно до поставленої мети вирішуватимуться такі завдання:

- проаналізувати теоретичні та методичні підходи до визначення та врахування лінійних та точкових коефіцієнтів теплопровідних включень огорожувальних конструкцій;

- розробити та верифікувати аналітичні моделі типових конструктивних вузлів огорожувальних конструкцій для поточних вимог законодавства до енергетичної ефективності та будівель nZEB;

- розробити динамічну енергетичну модель для обраних типових будівель різного призначення, яка включатиме архітектурні, конструктивні, технічні та функціональні особливості об'єктів моделювання;

- вибрати та обґрунтувати показники енергетичної ефективності будівлі для аналізу впливу саме теплопровідних включень;

- проаналізувати отримані результати та надати рекомендації щодо застосування отриманої інформації в проектуванні енергоефективних будівель.

**Об’єктом дослідження** є енергетичний стан будівель різного призначення з урахуванням варіантів конструктивних рішень, матеріалів, товщини теплоізоляційного шару, характеру термічної неоднорідності та умов експлуатації в кліматичних умовах України.

**Предметом дослідження** є процеси теплопередачі в огорожувальних конструкціях з теплопровідними включеннями, а також вплив теплопровідних включень на визначені енергетичні показники будівель різного призначення.

**Методи дослідження.** Основу проведеного дослідження склало чисельне моделювання методом скінченних елементів (FEM) – використання програмного забезпечення THERM для розрахунку температурних полів та теплових потоків у конструктивних вузлах. Динамічне енергетичне моделювання будівель – з застосуванням програм DesignBuilder та EnergyPlus. Методи сценарного та порівняльного аналізу та синтезу.

**Наукова новизна результатів дослідження** полягає в наступному:

- поглиблено аналіз теплового стану типових вузлів термічно неоднорідних огорожувальних конструкцій будівель різного призначення для поточних вимог законодавства до енергетичної ефективності та будівель nZEB.
- розвинуто підходи використання динамічних 3D-моделей громадських та житлових будівель для детального моделювання енергопотреб на опалення та охолодження з врахуванням різного рівня теплового захисту та теплопровідних включень.
- вперше проведено оцінку впливу улаштування вузлів огорожувальних конструкцій та теплопровідних включень на енергопотребу на опалення та охолодження будівель різного призначення для кліматичних умов України.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що було розроблено моделі основних конструктивних вузлів теплопровідних включень в програмному середовищі THERM та динамічну енергетичну модель в програмному середовищі DesignBuilder з метою моделювання енергопотреб на опалення та охолодження для будівель різного функціонального призначення: громадської будівлі навчального закладу та багатоквартирної житлової будівлі..

Отримані результати можуть бути використані в інженерній та проєктній практиці для:

- оптимізації конструктивних вузлів з метою зменшення тепловтрат та приведення будівель до рівня nZEB;
- підвищення точності розрахунків енергетичних характеристик будівель при енергоаудиті, сертифікації та проєктуванні;
- формування базових сценаріїв для BIM-моделей у сучасних архітектурно-інженерних середовищах, що включають аналіз вузлів у THERM, DesignBuilder, EnergyPlus;
- адаптації існуючих будівель під сучасні вимоги енергозбереження з мінімальними витратами на реконструкцію.

Результати дослідження можуть бути впроваджені в навчальний процес технічних університетів при підготовці фахівців у дисциплінах, пов'язаних з енергоефективністю будівель.

Запропоновані методичні підходи, сформовані сценарії енергетичного моделювання та апробовані інструменти можуть стати практичною основою для оновлення нормативно-методичної бази, зокрема при вдосконаленні вимог щодо обов'язкового врахування теплопровідних включень у розрахунках енергоспоживання.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація є завершеною науковою працею. Автором особисто отримані всі наукові положення і результати, наведені в дисертаційній роботі. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: здійснено огляд та аналіз нормативно-методичної бази України та Європейського Союзу з питань енергоефективності,

теплозахисту та врахування теплопровідних включень в будівлях; підібрано програмні інструменти для чисельного і динамічного моделювання (THERM, DesignBuilder, EnergyPlus) [50]; виконано збір вихідних даних та характеристику об'єктів дослідження (громадської та житлової будівлі) та побудовано відповідні енергетичні моделі в середовищі DesignBuilder [71]; побудовано 2D-моделі конструктивних вузлів, та виконано чисельні розрахунки температурних полів, теплових потоків, коефіцієнтів  $\psi$  з використанням FEM-моделювання; розроблено сценарії енергетичного моделювання для визначення впливу теплопровідних включень на енергоспоживання будівель; сформульовано рекомендації щодо покращення конструктивних рішень вузлів та можливості інтеграції результатів у проєктну практику.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати наукових досліджень, викладених у дисертаційній роботі, було представлено на міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях, зокрема: на VIII міжнародній науково-практична конференція «Енергоефективний університет», м. Київ, 2019 рік; XII науково-технічної конференції інституту енергозбереження та енергоменеджменту «Енергетика. Екологія. Людина», м. Київ 2020 рік; Конференція Аспірантські читання імені професора Артура Веніаміновича Праховника, м. Київ, 2024 рік.

**Публікації.** Матеріали дисертаційної роботи опубліковано у 7 наукових працях: 5 статей у наукових фахових виданнях (5 статті у фахових виданнях України), 2 тези доповідей у збірниках матеріалів конференції.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 71 найменування. Загальний обсяг дисертації складає 178 сторінок, 76 рисунків, 49 таблиць.



## **РОЗДІЛ 1 МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ ТА ЇХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

### **1.1 Нормативні засади енергоефективності будівель та їх огороджувальних конструкцій**

Енергетична ефективність будівель є одним з ключових пріоритетів сучасної України, адже від неї залежить не лише комфорт та безпека людей, але й економічна та екологічна ситуація в країні. Так, у 2017 році був прийнятий закон «Про енергоефективність будівель», який визначає правові, соціально-економічні та організаційні засади діяльності у сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель і спрямований на зменшення споживання енергії у будівлях [1]. Таким чином сформовано основні принципи державного впливу в цій області, а саме:

- гарантування встановленого рівня енергетичної ефективності будівель відповідно до всіх необхідних національних стандартів, правил і методик для нових будівель;
- оцінка скорочення викидів парникових газів у атмосферу;
- розробка національного плану щодо впровадження та будівництва будівель з мінімальним рівнем споживання енергії;
- створення сприятливих умов щодо інвестицій з метою реалізації заходів із підвищення рівня енергетичної ефективності будівель;
- проведення реновації та термомодернізації вже існуючих будівель;
- використання відновлюваних джерел енергії.

Варто зазначити, що відповідно до [1], виокремлюються об'єкти, на які не поширюються положення цього закону. Це промислові та сільськогосподарські будівлі, індивідуальні житлові будинки (крім випадків отримання державної допомоги на термомодернізацію або сертифікацію цього виду будівель), релігійні об'єкти та ті, які відносяться до культурної спадщини, а також окремі будівлі з

опалювальною площею менш як 50 квадратних метрів. Відповідно для інших об'єктів сертифікація рівня енергетичної ефективності та отримання відповідного енергетичного сертифікату будівлі є обов'язковою, а саме для об'єктів нового будівництва (реконструкції, капітального ремонту), будівель державної власності та будівель, в яких здійснюється термомодернізація за участю держави.

Енергоспоживання будівлі може оцінюватись як розрахунковий або фактичний річний обсяг енергії, необхідної для забезпечення опалення при дотриманні нормативних вимог до енергетичних показників та температур, визначених у [2] та [3]. Для цього зазвичай застосовується методика розрахунку на основі показника градусо-днів (ГД), що дозволяє враховувати середні температури зовнішнього повітря та внутрішнього мікроклімату. Хоча цей підхід дозволяє адаптувати оцінки до фактичних температурних умов, він поступається точністю більш складним методам, що враховують динамічне зовнішнє середовище та теплофізичні властивості конструкцій будівлі.

Методологія, запропонована європейським стандартом EN ISO 52016, який застосовується в Україні як [4] та [5], визначає підходи до розрахункового методу оцінки щорічного енергоспоживання для опалення та охолодження. Стандарт окреслює дві основні методології для розрахунку енергоспоживання при опаленні та охолодженні: квазістаціонарний метод (розрахунок на тривалість, наприклад, місяць чи опалювальний період) та динамічний метод (розрахунок за короткий проміжок часу, зазвичай одну годину).

Спрощений погодинний метод дозволяє відслідковувати зміну енергопотреби в залежності від часових інтервалів, що полегшує визначення комфортних умов у приміщенні. До недоліків наведеного методу можна віднести той аспект, що не враховуються всі компоненти, які споживають енергію, такі як гаряча вода, вентиляція та освітлення.

Безпосереднє визначення рівня енергетичної ефективності будівель реалізується відповідно до наказів [6] та [7], на основі національного стандарту [8], який гармонізовано відповідно до європейських стандартів та вимог у сфері енергоефективності. При енергетичній сертифікації обов'язково враховуються такі

фактори, як: кліматичні умови, призначення будівлі, її геометричні та технічні характеристики, мікроклімат всередині будівлі, ефективність інженерних систем.

Вимоги до проєктування та рівня енергоефективності інженерних систем будівлі, зокрема систем опалення, вентиляції, кондиціонування повітря будівель наведено в [9].

Показники енергоефективності та мінімальні вимоги до теплотехнічних властивостей огорожувальних конструкцій (ОК) будівель і споруд регламентуються відповідно до ДБН В.2.6-31[10]. Актуальні вимоги мінімального опору теплопередачі огорожувальних конструкцій для першої та другої температурної зони України наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Мінімально допустиме значення приведенного опору теплопередачі ОК  $R_{q.min}$

№	Вид огорожувальної конструкції	Значення $R_{q.min}$ , $m^2 \cdot K / Wt$ для температурної зони	
		I	II
1	Зовнішні стінові огорожувальні конструкції	4,00	3,50
2	Суміщенні покриття що межують із зовнішнім повітрям	7,00	6,00
3	Покриття опалювальних горищ (технічних поверхів), мансард, горищні перекриття неопалювальних горищ	6,00	5,50
4	Перекриття що межують із зовнішнім повітрям, та над неопалювальними підвалами	5,00	4,00
5	Світлопрозорі огорожувальні конструкції	0,90	0,70
6	Зенітні ліхтарі	0,80	0,70
7	Зовнішні двері	0,70	0,60

Саме положення вищезгаданих норм встановлюють мінімальні вимоги, значення яких є обов'язковим при проєктуванні та будівництві (термомодернізації та капітальному ремонту) будівель в Україні, з врахуванням місцевих кліматичних, санітарно-гігієнічних та мікрокліматичних умов, функціонального призначення будівлі та її геометричних, теплотехнічних характеристик та питомого енергоспоживання на опалення та охолодження. Також в нормах [10] наведено

допоміжну інформацію, яка необхідна при розрахунку з метою енергетичної сертифікації будівель.

Зменшення тепловтрат через огорожувальні конструкції дозволяє скоротити енергоспоживання на опалення та кондиціонування, й, відповідно, скоротити викиди парникових газів. Всі ці фактори є одними з ключових цілей Директиви 2010/31/ЄС про енергетичні характеристики будівель, яку наша країна зобов'язалась виконувати разом з гармонізацією вітчизняних стандартів та норм відповідно до нормативної бази Європейського Союзу [11].

Додатково варто зазначити що в Європейському Союзі вже була прийнята нова Директива 2024/1275/ЄС [12], яка поки не прийнята в Україні. Серед основних положень директиви є встановлення стандарту "будівель з нульовими викидами" для всіх нових будівель: з 2028 року для громадських будівель та з 2030 року для інших, а також посилення вимог до енергетичної ефективності існуючих будівель. Ці оновлення відображають прагнення ЄС досягти кліматичної нейтральності до 2050 року та сприяють зменшенню споживання енергії в будівельному секторі. Відповідно до наведених вище директив в Україні було прийнято вимоги до будівель з близьким до нульового рівня енергоспоживання (nZEB – nearly Zero Energy Buildings) [13]. Так, у Європейському Союзі (ЄС) відповідати вимогам стандартів nZEB починаючи з 2019 року мають нові державні будівлі, а з 2021 року всі нові будівлі. У вітчизняних вимогах до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії обов'язковою є мінімальна відповідність класу енергетичної ефективності «А» для нових будівель, а при реконструкції, відповідність класу енергетичної ефективності «В». Окрім класу енергоефективності регламентуються вимоги до таких показників, як споживання первинної енергії з невідновлюваних джерел енергії; частка енергії, виробленої з відновлюваних джерел енергії; теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій; герметичність оболонки; ефективність інженерних систем.

Зокрема, мінімальні теплотехнічні властивості огорожувальних конструкцій регламентуються не через застосування чітких величин коефіцієнтів теплопередачі, а через мінімальну товщину теплоізоляційних матеріалів огорожувальних

конструкцій, але значення приведенного опору теплопередачі має бути не меншим ніж визначається нормами[10]:

- 100 мм для підлог по ґрунту;
- 200 мм для зовнішніх стінових огорожувальних конструкцій;
- 300 мм для покриття опалюваних горищ (технічних поверхів), мансард, горищних перекриттів неопалюваних горищ;
- 400 мм для суміщених покриттів, що межують із зовнішнім повітрям.

Значення приведенного опору теплопередачі для світлопрозорих огорожувальних конструкцій будівель з близьким до нульового рівня енергоспоживання наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Теплотехнічні властивості світлопрозорих огорожувальних конструкцій для будівель nZEB

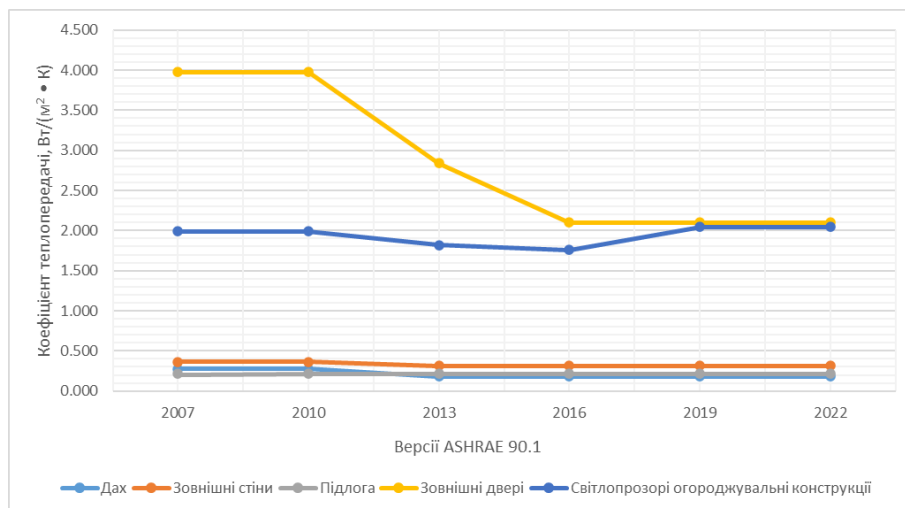
Вид огорожувальної конструкції	Мінімальне значення $R$ , $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ , для температурної зони		Максимальне значення $U_w$ , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , для температурної зони	
	I	II	I	II
Світлопрозорі огорожувальні конструкції	1,1	1,0	0,9	1,0
Зенітні ліхтарі	1,0	0,9	1,0	1,1
Зовнішні двері	0,8	0,7	1,2	1,4
Скляні фасади	1,3	1,1	0,8	0,9

Ще одним важливим міжнародним стандартом щодо визначення рівня енергоефективності будівель також є ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1 [14]. Одразу варто зауважити, що даний міжнародний стандарт, не встановлює мінімальні вимоги до енергоефективності проєктування та будівництва для низькоповерхових житлових будинків (менше трьох поверхів вище рівня ґрунту). Стандарт розроблений спільно Американською асоціацією інженерів з опалення, вентиляції, кондиціонування та холодильної техніки (ASHRAE) та Північноамериканським

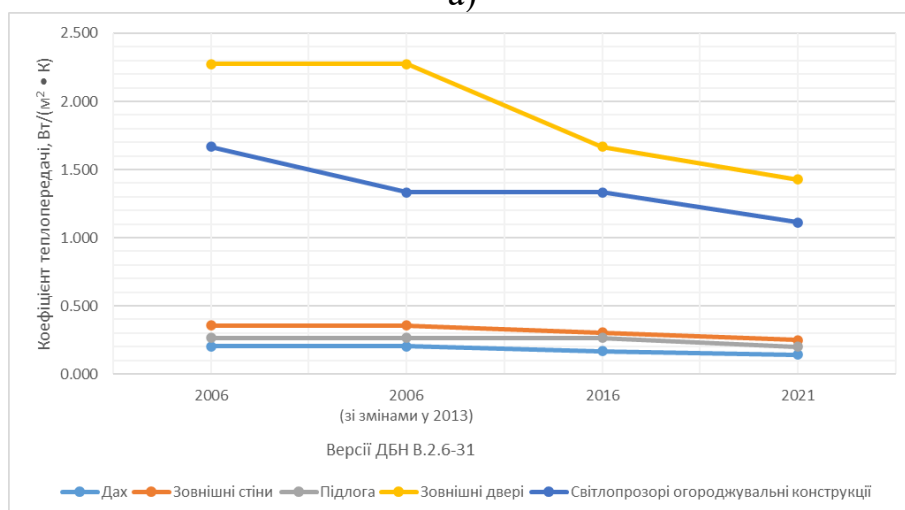
товариством освітлювальної інженерії (IES). Стандарт оновлюється кожні три роки і є основою для енергетичних кодексів, які приймаються штатами США та іншими країнами світу. До особливостей стандарту ASHRAE 90.1 можна віднести наступне:

- вимоги до енергоефективності для різних компонентів будинку, таких як оболонка, освітлення, опалення, вентиляція, кондиціонування, холодильне обладнання, гаряче водопостачання, пожежна безпека тощо;
- враховує кліматичну зону, тип будинку, тип конструкції та інші фактори, які впливають на енергоспоживання;
- має додатковий розділ про використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна енергетика, вітрова енергетика, геотермальна енергетика тощо;
- має додатковий розділ про нормативи для центральних систем опалення та охолодження, які обслуговують багато будинків.

Очевидно, що однією з відповідей на виклики підвищення рівня енергоефективності будівель є той факт, що вимоги до мінімального опору теплопередачі підвищуються з часом. Відповідно до [14] Київ відноситься до кліматичної зони 5А. Порівняльний графік зміни мінімальних вимог до теплопередачі огорожувальних конструкцій міжнародного стандарту ASHRAE 90.1 та ДБН В.2.6-31 для кліматичної зони Києва в продовж останніх двох десятиліть наведено на рисунку 1.1.



а)



б)

Рисунок 1.1 – Теплопередача огорожувальних конструкцій відповідно до стандарту (а) ASHRAE 90.1 та (б) ДБН В.2.6-31 в період з 2006 по 2022 рік.

Як видно з рисунку 1.1, вимоги до теплопередачі згідно ДБН В.2.6-31 є більш жорсткими в порівнянні зі стандартом США. Стрибок у вимогах до теплопередачі вікон відповідно до ASHRAE-90.1 зумовлений зміною підходу до вимог енергоефективності в залежності від матеріалу рами світлопрозорої огорожувальної конструкції.

Одним з ключових параметрів, які є особливо важливими за впливом на рівень енергопотребі будівлі є показник теплопередачі трансмісією. Цей показник характеризується кількістю теплоти, яка передається через огорожувальну конструкцію (стіну, підлогу, дах тощо) за одиницю часу при одиничній різниці

температур з обох сторін конструкції. Показник теплопередачі трансмісією залежить від типу матеріалу огорожувальної конструкції, його товщини, форми та поверхневих характеристик конструкції, що характеризується приведеним коефіцієнтом теплопередачі оболонки будівлі для непрозорих конструкцій, який визначається за формулою:

$$U_i = 1/R_{\Sigma, \text{пр}}, \quad (1.1)$$

де  $R_{\Sigma, \text{пр}}$  – приведений опір теплопередачі,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ .

В свою чергу, приведений опір теплопередачі відповідно до [15] визначається за наступною формулою:

$$R_{\Sigma, \text{пр}} = \frac{A_{\Sigma}}{\sum_i (A_i / R_{\Sigma i}) + \sum_m (l_m \cdot \psi_m) + \sum_n (N_j \cdot \chi_j)}, \quad (1.2)$$

де  $A_{\Sigma}$  – загальна площа огорожувальної конструкції, обчислена за внутрішнім виміром із додаванням площ внутрішніх укосів прорізів та відніманням площ прорізів,  $\text{м}^2$ ;

$A_i$  – площа  $i$ -ої термічно однорідної частини непрозорої конструкції, що не містить площі внутрішніх укосів прорізів та площі ділянок зовнішніх огорожень будівлі, які контактують з іншими теплопровідними включеннями,  $\text{м}^2$ ;

$R_{\Sigma i}$  – опір теплопередачі  $i$ -ої термічно однорідної частини конструкції,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ;

$\psi_m$  – лінійний коефіцієнт теплопередачі  $m$ -го лінійного теплопровідного включення,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$l_m$  – лінійний розмір (проекція)  $m$ -го лінійного теплопровідного включення,  $\text{м}$ ;

$\chi_j$  – точковий коефіцієнт теплопередачі  $j$ -го точкового теплопровідного включення,  $\text{Вт}/\text{К}$ ;

$N_j$  – загальна кількість  $j$ -их точкових теплопровідних включень, що розташовані на загальній площі огорожувальної конструкції без урахування площ внутрішніх укосів прорізів, шт.

Як видно з наведених вище формул, значний вплив на теплопередачу трансмісією вчиняють лінійні та точкові коефіцієнти для теплопровідних включень.



На сьогоднішній день при енергетичній сертифікації будівель в Україні можна користуватись декількома різними методами оцінки впливу теплопровідних включень. Так, у методиці [8] за відсутності інформації чи її недостатній кількості щодо теплопровідних включень у конструкції переважно існуючих будівель, можливо використовувати коригуючу поправку  $\Delta U_{tb}$  до коефіцієнта теплопередачі по основному полю, розрахункові значення якої наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Значення додаткової складової до коефіцієнта теплопередачі, які враховують вплив теплопровідних включень

Середнє значення коефіцієнта теплопередачі непрозорої частин конструкцій, $W/(m^2 \cdot K)$	$\Delta U_{tb}$ , $W/(m^2 \cdot K)$
$U_{op,mn} \geq 0,8$	0,0
$0,4 \leq U_{op,mn} \leq 0,8$	0,05
$U_{op,mn} \leq 0,4$	0,10

Варто зазначити, що наведені у таблиці показники додаткової складової коефіцієнту теплопередачі зазвичай сильно завищують кінцеве значення коефіцієнту теплопередачі та є досить грубим методом обчислення.

Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення житлових, громадських та промислових будівель під час проектування, нового будівництва, реконструкції, капітального ремонту, зокрема з метою термомодернізації регламентується відповідно до стандарту [15].

У додатках Г та Д до [15] наведена певна кількість типових вузлів термічно неоднорідних огорожувальних конструкцій та значення лінійних та точкових коефіцієнтів теплопровідних включень, використання яких значно підвищує точність розрахунку приведенного опору теплопередачі огорожувальної конструкції.

Спрощені методики визначення теплових потоків крізь лінійні теплопровідні включення, що утворюються в місцях з'єднань конструктивних елементів будівлі також наведено в стандарті [16], проте, важливо зазначити, що в [16] є обмеження

щодо його застосування при аналізі теплопровідних включень, пов'язаних з віконними та дверними рамами.

Основним фундаментальним діючим національним стандартом який визначає загальні методи для розрахунку теплових потоків і поверхневих температур термічно неоднорідних ділянок (містків холоду) у будівельних конструкціях є [17]. Стандарт встановлює специфікації для 3-D геометричної моделі вузла будівлі з теплопровідним включенням, граничних умов, властивостей матеріалу та чисельних методів для розв'язання рівняння теплопередачі. Стандарт також надає правила для визначення коефіцієнтів теплопередачі та теплового потоку, а також мінімальних поверхневих температур теплопровідного включення.

Метод обчислення теплопровідного включення, який використовується у [17], базується на розв'язанні рівняння теплопередачі для тривимірної геометричної моделі теплового мосту. Для цього застосовуються чисельні методи, такі як метод скінченних елементів, метод скінченних різниць, метод контрольних об'ємів тощо. Метод обчислення теплопровідного включення дозволяє визначити коефіцієнти теплопередачі і теплового потоку, а також мінімальні поверхневі температури теплопровідного включення. Обчислення поверхневої густини теплового потоку, перпендикулярного до межі розділу між секціями матеріалу і прилеглим середовищем відбувається за формулою:

$$q = \frac{(\theta - \theta_s)}{R_s}, \quad (1.3)$$

де  $q$  – поверхнева густина теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;

$\theta$  – зовнішня або внутрішня опорна температура, К;

$\theta_s$  – температура на зовнішній або внутрішній поверхні, К;

$R_s$  – зовнішній або внутрішній поверхневий опір, м<sup>2</sup>·К/Вт.

В свою чергу, поверхнева густина теплового потоку  $\Phi_{i,j}$  з середовища  $i$  до термічно прилеглого середовища  $j$  дорівнює:

$$\Phi = L_{i,j}(\theta_i - \theta_j), \quad (1.4)$$

де  $\Phi$  – поверхнева густина теплового потоку, Вт/м;

$\theta_i$  – температура  $i$ -го середовища, К;

$\theta_j$  – температура  $j$ -го термічно прилеглого середовища, К;

$L_{i,j}$  – лінійний коефіцієнт теплового зв'язку, Вт/м·К;

Сам розрахунок лінійного коефіцієнта теплопередачі лінійного теплопровідного включення виконується згідно з [17] за формулою:

$$\Psi = L^{2D} - \sum_{j=1}^J U_j \cdot l_j, \quad (1.5)$$

де  $L^{2D}$  – лінійний коефіцієнт теплового зв'язку, який отримано обчисленням двовимірного фрагмента, який розділяє два досліджуваних середовища, Вт/м·К;

$U_j$  – коефіцієнт теплопередачі одновимірного фрагмента  $j$ , який розділяє два досліджуваних середовища, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$l_j$  – довжина, до якої застосовано значення  $U_j$ , м.

Значення точкового коефіцієнта теплопередачі визначають за формулою:

$$X = L^{3D} - \sum_{j=1}^J L_j^{2D} \cdot l_j + \sum_{i=1}^I U_i \cdot A_i, \quad (1.6)$$

де  $L^{3D}$  – коефіцієнт теплового зв'язку, який отримано обчисленням тривимірного фрагмента, який розділяє два досліджуваних середовища, Вт/К.

Стандарт [18] стосується лінійних теплопровідних включень, які обмежено двома різними тепловими середовищами. Для обчислення поверхневої температури третю температуру приграничного шару застосовують лише за умови, що теплопровідне включення перебуває у тепловому контакті з ґрунтом. Лінійне теплопровідне включення може бути представлено у перерізі, що забезпечує основу двовимірної геометричної моделі.

Оскільки двовимірна модель є спрощенням реальної конструкції, то результати обчислення є апроксимаціями розрахунків за тривимірною моделлю згідно з [17]. Похибки, спричинені цим спрощенням, стосуються довжини лінійних теплопровідних включень, яку часто не зазначають. Методи обчислення, наведені в цьому стандарті, названі методами «Класу В», щоб відрізнити їх від методів «Класу А», наведених в [17]. Хоча в цих стандартах застосовано схожі методики обчислення, вони не є ідентичними для обчислення теплового потоку і поверхневої температури. До [18] покладено критерії, яким він повинен відповідати, щоб метод обчислення лінійних теплопровідних включень можна було описати як метод

«Класу В». Також важливо зазначити, що цей стандарт не забезпечує надійних результатів оцінки конденсації вологи на поверхні огорожувальної конструкції. При тому, що точну температуру внутрішньої поверхні можна обчислити за допомогою двовимірної моделі, реальна мінімальна поверхнева температура може бути нижча при наявності інших лінійних або точкових теплопровідних включень поруч.

Додатковим аспектом, який демонструє все більшу актуальність детального врахування теплопровідних включень є те, що в наказі [13] висувуються вимоги до максимального значення лінійних коефіцієнтів теплопередачі містків холоду в будівлях з близьким до нульового рівнем споживання енергії:

Таблиця 1.4 - Максимальні значення лінійних коефіцієнтів теплопередачі теплопровідних включень

Вид огорожувальної конструкції	Максимальне значення лінійного коефіцієнту теплопередачі, $\Psi_m$ , Вт/(м·К)
Вузли кутового сполучення зовнішніх стін	0,15
Вузли примикання віконної конструкції до зовнішніх стін	0,03
Вузли примикання конструкції суміщеного покриття, що межують із зовнішнім повітрям до зовнішніх стін	0,15
Вузли примикання конструкції підлоги по ґрунту або підлоги над опалюваними/неопалюваними підвалами до зовнішніх стін та конструкцій фундаменту	0,3
Вузли примикання консольно закріплених балконних плит перекриття із зовнішньою стіною	0,3

Також вимоги з врахування термічно неоднорідних ОК вперше з'явилися в останній версії описаного раніше стандарту ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1 [14]. Так, регламентується мінімізація впливу теплопровідних включень шляхом

застосування чітко визначених технік з ізоляції типових з'єднань ОК, тобто підхід схожий з описаним в національному стандарті [15].

## **1.2 Останні вітчизняні дослідження у сфері енергоефективності та оцінки теплопровідних включень у будівлях**

У сучасних дослідженнях теплопровідні включення розглядаються як один з критичних факторів, що впливають на тепловтрати та загальну енергоефективність будівель. Актуальність цього питання зростає у контексті переходу до майже нульового енергоспоживання (nZEB) та оновлення нормативної бази згідно з директивами ЄС. Останні дослідження у сфері енергоефективності будівель та оцінки теплопровідних включень (теплових містків) зосереджені на вдосконаленні методів виявлення, математичне моделювання та зменшення їх впливу на теплові втрати.

Так, у статті Г.Г. Фаренюка, Є.Г. Фаренюка та М.В. Тимофєєва (2024) [19] здійснено глибокий аналіз та методичне обґрунтування підходів до вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель, що було реалізовано у новому нормативному документі — ДСТУ 9191:2022. Автори наголошують на зростанні значущості правильного вибору матеріалів при проєктуванні огорожувальних конструкцій, які є термічно неоднорідними за своєю структурою. Було проаналізовано відмінності між старою версією стандарту (ДСТУ Б В.2.6-189:2013) та новою редакцією (ДСТУ 9191:2022). Також було детально розглянуто відмінність між двома основними формулами: одна — для загального розрахунку огороження з усіма включеннями (перекриття, укоси, кути), друга — для часткової оцінки, наприклад, окремих зон світлопрозорих фасадів. Це дозволяє більш гнучко та точно визначати товщину утеплювача в різних частинах огорожувальної оболонки. Також узагальнено вимоги щодо врахування коефіцієнтів скління, коефіцієнтів теплообміну, температурного перепаду та компактності будівлі. Важливо, що також зазначається необхідність подальшого розширення бази даних лінійних і точкових коефіцієнтів теплопередачі для різних типів вузлів.

Наприклад, у статті Шовкалюк М.М. та Зіменка С.В. (2017) [20] проведено глибокий аналіз тепловтрат через огорожувальні конструкції з урахуванням різних підходів до оцінки теплозахисних властивостей. Об'єктом дослідження виступила багатоповерхова житлова будівля з частково утепленими зовнішніми стінами. Було порівняно результати теплотехнічних розрахунків, виконаних трьома основними методами: без урахування теплопровідних включень, з урахуванням містків холоду згідно з національним стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015 (розробленим на основі EN 13790), та урахуванням включень за європейським стандартом EN 12831 (з використанням коригувальних коефіцієнтів). Результати показали, що спрощений підхід без урахування містків холоду занижує фактичні тепловтрати до 14%, тоді як застосування ДСТУ Б А.2.2-12:2015 забезпечує найменше відхилення від даних натурних вимірювань — лише 6,5%. Європейська методика EN 12831, яка базується на загальних поправочних коефіцієнтах, дала завищене значення тепловтрат і відхилення на рівні 14%. Автори підкреслюють, що ігнорування містків холоду під час енергоаудиту може призводити до некоректної оцінки енергоспоживання і є методологічно необґрунтованим.

У статті В.І. Дешко, І.Ю. Білоус та С.О. Крамаренка (2020) [21] розглянуто проблему додаткових тепловтрат у місцях примикання віконних рам до огорожувальних конструкцій. Згідно з авторами, при покращенні теплофізичних характеристик огорожень зростає значущість впливу лінійних теплопровідних включень, особливо в зонах стику вікон з зовнішніми стінами. Результати показали, що для однакової товщини стіни з виконанням з різних матеріалів опір теплопередачі може покращитись вдвічі ( $R = 6,10 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$  проти  $2,96 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ ). Водночас, врахування лінійних теплопровідних включень погіршує опір стіни з цегли на 20%, а з газоблоку — на 33%, через підвищену чутливість теплоізоляційного матеріалу до таких втрат. Також було виявлено, що при зростанні коефіцієнта застосування (відношення площі вікон до загальної площі стіни) вплив містків холоду значно зростає. Автори роблять висновок, що ігнорування ефектів теплопровідних включень під час енергетичного моделювання або енергоаудиту призводить до недооцінки тепловтрат і, відповідно, до помилкових висновків щодо

ефективності будівлі.

У дослідженні Г.С. Ратушняка, А.М. Очеретного та О.Ю. Материнської (2018) [22] розглянуто питання підвищення енергоефективності житлових будівель шляхом термомодернізації вузлів примикання вікон до зовнішніх огорожувальних конструкцій. Автори відзначають, що навіть у новобудовах, які зведені з дотриманням сучасних нормативних вимог до термічного опору, тепловізійне обстеження фасадів фіксує значні тепловтрати саме у зонах примикання віконних рам. Це свідчить про наявність теплопровідних включень і про недосконалість конструктивного виконання цих вузлів. Підкреслюється, що типовий підхід до заміни віконних блоків у процесі термомодернізації часто не враховує необхідність покращення термічного захисту у зонах примикання. Пропонується розглядати ці ділянки як зони локальних теплопровідних включень, що потребують удосконалених архітектурно-конструктивних рішень. На основі аналізу теплофізичних характеристик вузлів примикання автори теоретично обґрунтовують доцільність впровадження нових конструктивних схем утеплення та представляють власні варіанти вузлів із покращеним термічним опором. За результатами теплових розрахунків та графічного аналізу температурних полів автори показали, що вдосконалене розташування теплоізоляційного матеріалу в зоні примикання дозволяє підвищити температуру внутрішньої поверхні конструкції, зменшити ризик утворення конденсату і, відповідно, підвищити тепловий комфорт у приміщенні. Таким чином, результати дослідження підтверджують важливість індивідуального проектування вузлів примикання віконних блоків до зовнішніх стін при термомодернізації будівель.

У ще одному дослідженні Г.С. Ратушняка, О.Ю. Горюн та А.О. Лялюка (2020) [23] більш детально розглянуто моделювання теплопередачі у вузлі примикання віконного блоку до зовнішньої стіни як одного з типових лінійних теплопровідних включень. Очевидно, що такі вузли є джерелом додаткових тепловтрат і значного зниження температури на внутрішній поверхні конструкції, що створює ризики конденсації та погіршення мікроклімату. Підвищення енергоефективності будівель було запропоновано шляхом удосконалення конструктивного виконання

примикання віконного блоку до зовнішньої стіни. Для досягнення цієї мети автори запропонували нову схему утеплення вузла з використанням аерогелевого утеплювача, теплоізоляційної штукатурки, армувальної сітки, шпаклівки та декоративного шару.

У статті науковців Ю.І. Боднара та М.В. Босецького (2024) [24] здійснено глибоке дослідження впливу теплопровідних включень (містків холоду) на теплоізоляційні властивості зовнішніх стін багатоповерхового житлового будинку з монолітним каркасом. У дослідженні було зосереджено увагу на вузлах стін, що містять типові теплопровідні включення: дюбелі кріплення теплоізоляції, віконні укоси, міжповерхові та балконні перекриття, колони та кутові примикання. Для аналізу їхнього впливу було застосовано метод скінченних елементів у програмному середовищі Agros2D. За результатами моделювання визначено температурні поля та теплові потоки, а також розраховано лінійні коефіцієнти теплопередачі ( $\Psi$ ) кожного типу включення. Так, видно, що найбільший негативний вплив мають балконні перекриття, частка яких у загальних трансмісійних тепловтратах може перевищувати 12,5%. Інші типи включень — віконні укоси, міжповерхові перекриття, кути з колонами — також чинять суттєвий вплив. Окрему увагу приділено кількісній оцінці внеску кожного типу включення в загальні втрати. Наприклад, боковий укіс вікна становив 3,4% внеску, кути з колонами — 4,3%, а балконні перекриття — до 9,8–12,5%. Ці результати свідчать про потребу в архітектурно-конструктивного вдосконалення вузлів примикання, що дозволить значно підвищити загальні енергетичні показники огорожувальних конструкцій.

У дослідженні О.Д. Панкевич, В.В. Миколаєнка та В.В. Панкевича (2020) [25] також розглядається актуальне питання впливу конструктивних рішень вузлових з'єднань огорожувальних конструкцій на загальну енергоефективність будівель. Автори підкреслюють, що вузли типу «стіна-перекриття», «стіна-віконний проріз», «зовнішній кут» та «стіна-цоколь» виступають джерелами інтенсивних тепловтрат, зумовлених наявністю теплопровідних включень, що істотно знижують значення приведенного опору теплопередачі. Аналізується низка запатентованих технічних рішень, що стосуються багатошарових стін із покращеними теплоізоляційними



властивостями, у тому числі конструкцій зі змінною товщиною шарів, з теплоінерційними та тепловими бар'єрами, застосуванням термовкладишів та інших елементів підвищеної ефективності. Окрема увага приділена тепловізійному аналізу та прикладним рішенням, запропонованим вітчизняними дослідниками, зокрема щодо утеплення вузлів стику перекриття на горищі, цоколя технічного підпілля та примикання віконного блоку до прорізу. У підсумку зазначається, що проектування огорожувальних конструкцій з урахуванням специфіки вузлових з'єднань є важливим етапом забезпечення нормативного рівня теплозахисту та досягнення цілей сталого будівництва відповідно до сучасних стандартів, таких як ДБН В.2.6-31.

### **1.3 Останні закордонні дослідження у сфері енергоефективності та оцінки теплопровідних включень у будівлях**

У дослідженні проведеному Kalle Kuusk, Jarek Kurnitski та Targo Kalamees (2017) [27] розглянуто підходи до розрахунку тепловтрат через теплопровідні включення у енергетичних розрахунках різних європейських країнах. Дослідження охоплює аналіз нормативних вимог і практичних процедур у дев'яти країнах: Австрії, Бельгії, Кіпрі, Естонії, Франції, Греції, Румунії, Іспанії та Швеції. Аналіз показав, що існують чотири основні методи врахування теплових містків:

- Детальні розрахунки на основі визначення лінійних коефіцієнтів теплопередачі ( $\Psi$ -значень).
- Спрощені базові правила (як у Бельгії), що дозволяють уникати розрахунків за умови дотримання певних будівельних рішень.
- Типові (табличні) значення, наведені у законодавстві або енергетичних калькуляторах (наприклад, Естонія, Австрія, Іспанія).
- Усереднені коефіцієнти теплопередачі, що включають вплив теплових містків (наприклад, у Румунії та Швеції).

Особлива увага приділяється тому, що в більшості країн специфічних процедур перевірки відповідності теплових характеристик будівель немає. Як

правило, контроль обмежується етапом видачі дозволу на будівництво, і не охоплює зміни, які можуть відбутися під час реального будівництва. Лише у Бельгії, Франції та Румунії запроваджено певні механізми контролю, пов'язані із тепловими містками. У висновках автори наголошують, що вплив теплових містків на енергоспоживання у високоізольованих будівлях може сягати 30% і більше. Оскільки розрахунок теплових містків є технічно не складнішим за динамічне енергетичне моделювання, запропоновано зробити розрахунок  $\Psi$ -значень обов'язковою частиною проєктної документації. Наявність консервативних табличних значень у багатьох країнах забезпечує «страховий запас» на випадок відсутності детальних розрахунків, однак детальні методи дозволяють суттєво точніше оцінити енергетичні характеристики будівлі. Варто також зазначити, що у дослідженні не було проаналізовано вплив теплопровідних включень на річне енергоспоживання будівель.

У статті Balázs Nagy, Martin Marosvölgyi та Zsuzsa Szalay (2022) [28] здійснено порівняльний аналіз методів розрахунку тепловтрат через теплопровідні включення у будівлях на прикладі сучасного житлового будинку з майже нульовим енергоспоживанням, типовим для угорського ринку. Було порівняно спрощені методики, національні каталоги теплових містків, детальне числове моделювання теплових потоків та комбіноване тепло-вологісне моделювання. Метою дослідження було оцінити точність та адекватність різних методів у визначенні теплових втрат через містки холоду. В роботі розглядалися спрощені національні підходи (TNM Decree 7/2006), каталог теплових містків за стандартом ISO 14683:2017, новий угорський національний каталог теплових містків (2020), а також моделювання в середовищі COMSOL Multiphysics. Результати показали, що спрощений підхід TNM дає найнижчі значення лінійних тепловтрат, тоді як використання каталогу ISO 14683 — найвищі, часто завищуючи втрати на 90% у порівнянні з іншими методами. Використання нового угорського каталогу теплових містків дає результати, близькі до детального моделювання, але є значно швидшим і простішим у використанні. За результатами розрахунків лінійні втрати тепла складають від 12% до 32% від поверхневих втрат залежно від методу розрахунку.

Важливо зазначити, що було визначено, що врахування вологості матеріалів у розрахунках (50% RH) збільшує теплові втрати на 7–20% порівняно із розрахунками для абсолютно сухих матеріалів (0% RH). Таким чином, дослідження підтверджує важливість ретельного вибору методології розрахунку теплових містків у залежності від цілей проєкту та бажаної точності оцінки енергетичних характеристик будівель.

А стаття Hua Ge та Fuad Baba (2017) [29] продемонструвала вплив теплових містків на енергетичні характеристики багатоквартирних житлових будинків із великою тепловою інерцією у холодному кліматі Канади. Автори звертають увагу, що традиційні підходи, такі як метод еквівалентного коефіцієнта теплопередачі ( $U$ -value), не враховують теплову інерцію містків холоду, що може призводити до суттєвих похибок у розрахунках енергоспоживання. Об'єктом дослідження стала типова висотна багатоквартирна будівля у Британській Колумбії. Результати моделювання показали, що включення теплових містків буде призводити до збільшення річного споживання енергії на опалення на 38–42% для монолітного бетону та на 24–28% для цегляної конструкції. Автори заключають, що для забезпечення точності енергетичних розрахунків при моделюванні будівель із високою тепловою інерцією доцільно або використовувати детальне моделювання теплових містків, або мінімізувати теплові містки на стадії проєктування конструктивних рішень. Хоча моделювання теплопровідних включень є досить складним, його впровадження має важливе значення у будівництві будівель класу "майже нульового споживання енергії" (nZEB).

У статті Simo Ilomets та співавторів (2017) [30] було досліджено вплив лінійних теплових містків на загальні тепловтрати огорожувальних конструкцій у багатоквартирних будинках, які були побудовані в період 1960–1990 років у країнах Східної Європи. Метою роботи було кількісне оцінювання внеску теплових містків у тепловтрати до і після реновації таких будівель із використанням типових матеріалів — збірного залізобетону, цегли, дерев'яних зрубів та автоклавованого газобетону. Дослідження базувалося на комплексі польових обстежень, тепловізійних досліджень та чисельного моделювання за допомогою програмного

забезпечення THERM відповідно до стандарту EN ISO 10211. Було продемонстровано, що перед реновацією теплові містки становили близько 23% від загальних тепловтрат через огорожувальні конструкції. Після реновації (при умові правильності виконання робіт: винесенні вікон у площину утеплення та утепленні або заміні балконних плит) їхній вплив зменшувався до 10%. Однак за недотриманням передових практик, коли вікна залишалися у старому положенні, а балкони не утеплювалися, частка теплових містків могла зрости до 34%.

Більш детально теплопровідне включення плити балкону було проаналізовано у дослідженні Pérez-Carramiñana та співавторів (2024) [31]. Акцентовано увагу на тому, що чинні іспанські норми не розрізняють містки холоду між балконами і фасадами та між перекриттями і фасадами, що призводить до суттєвої похибки у розрахунках енергетичних характеристик будівель. Дослідження базується на трьох основних етапах:

1. Тепловізійне обстеження групи будинків, збудованих у 2018–2022 рр. у місті Аліканте, для визначення найхарактерніших типів теплових містків.
2. Поглиблений аналіз двох обраних будівель (9-поверхова та 4-поверхова) за допомогою тепловізійної зйомки, натурних вимірювань теплового потоку та чисельного моделювання.
3. Комп'ютерні симуляції енергетичних характеристик з оцінкою впливу теплових містків на загальні щорічні енергетичні потреби будівель.

Результати показали, що теплові містки у місцях примикання балконів складають 24–26% від усіх теплових містків будівлі за площею і мають середню різницю температур  $1,3\text{--}1,6^{\circ}\text{C}$  порівняно з іншими зонами фасаду. Лінійна теплопередача у цих вузлах сягає  $0,529\text{--}0,653\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , що перевищує показники інших типів теплових містків (наприклад, у місцях примикання перекриттів до фасадів —  $0,320\text{--}0,477\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ). Кількісний аналіз показав, що балконні теплові містки спричиняють 26%–38,5% усіх тепловтрат через теплопровідні включення у досліджуваних будівлях. У будівлях із фасадом з цегли з внутрішнім утепленням негативний вплив містків більш виражений порівняно з фасадами, утепленими системою ETICS. По результатах дослідження було підкреслено, що наявна

нормативна база в Іспанії потребує оновлення для точного врахування теплових містків на балконах. Тобто прослідковується спільний для багатьох країн фактор, що наявні конструктивні вузли з визначеними характеристиками теплопровідних включень потребують оновлення та розширення у каталогах відповідних нормативних стандартів.

У статті Šadauskienė та співавторів (2022) [32] проведено експериментальне та чисельне дослідження теплопровідних включень, що виникають при встановленні вискоєфективних вікон у теплоізоляційний шар будівельної огорожувальної конструкції. Автори підкреслюють, що хоча встановлення вікон у площині теплоізоляції суттєво знижує тепловтрати через лінійні містки, проте вплив точкових містків (через кріпильні елементи) часто недооцінюється. Серед основних результатів дослідження було встановлено, що використання ізоляційних рам із жорсткої мінеральної вати (SWB) дозволяє знизити лінійний коефіцієнт теплопередачі теплопровідного включення  $\Psi_{SWB}$  до 0.026 Вт/(м·К), що на 80% менше порівняно зі стандартним рішенням. Однак врахування тепловтрат через металеві кріплення збільшує загальне  $\Psi_T$  до 0,078–0,085 Вт/(м·К) залежно від способу монтажу та розрахункової методики. Розташування вікна у межах 70–80 мм від несучого шару стіни було визначено оптимальним для мінімізації теплових втрат. Тобто для точного прогнозування енергетичних характеристик у будівлях класу nZEB і пасивних будівлях рекомендовано враховувати вплив точкових теплових містків через тривимірне моделювання.

Цікавим видається підхід до врахування теплопровідних включень в Азії. Так, у статті Zhang X., Jung G.-J. та Rhee K.-N. (2022) [33] було проведено всебічне дослідження методів зменшення тепловтрат через теплопровідні включення у балконних плитах багатоквартирних будинків в умовах Кореї, де поширені системи внутрішнього утеплення та водяного підігріву підлоги. Метою роботи було оцінити ефективність традиційних теплових розривів (thermal breaks) та новітніх систем на основі армованого скловолокном полімеру для зменшення тепловтрат через балконні плити. Серед розглянутих 12 варіантів конструктивних рішень із зовнішньою та внутрішньою системами утеплення, за умови використання

повітряного чи підлогового опалення було проведено чисельне моделювання в програмному середовищі Physibel-TRISCO для визначення лінійних коефіцієнтів теплопередачі та TRNSYS-симуляції для розрахунку річного споживання енергії на опалення. Серед основних результатів дослідження можна виокремити наступне:

- застосування теплових розривів дозволило зменшити  $\psi$ -фактор на 61–66%, тоді як використання нового матеріалу забезпечувало ще кращі результати — до 70–75% зниження порівняно з балконами без терморозривів.
- в умовах підлогового опалення втрати через балконні плити були на 30–40% вищими, ніж при повітряному опаленні через більший перепад температур, що підтверджує критичну важливість мінімізації теплових містків у таких системах.
- річне споживання енергії на опалення при використанні терморозриву з полімером знижувалося на 6–8% порівняно з варіантом без терморозриву, що для квартирної будівлі середнього розміру еквівалентно значним енергетичним заощадженням.
- системи зовнішнього утеплення виявились ефективнішими у мінімізації теплових містків у балконних плитах, ніж системи внутрішнього утеплення.

У статті Kim M.-Y., Kim H.-G., Kim J.-S. та Hong G. (2022) [34] також було досліджено теплову та енергетичну ефективність нової системи теплоізоляційного розриву для багатоповерхових житлових будинків із залізобетонним каркасом у Південній Кореї. Запропонований теплоізоляційний розрив складався з чергуючих модулів із 150 мм теплоізоляції та 50 мм високоміцного бетону, об'єднаних армуванням. Для дослідження теплопровідності були проведені 3D-розрахунки в програмі Physibel (згідно з ISO 10211), а для оцінки річного енергоспоживання застосовано енергетичне моделювання в EnergyPlus. Встановлення теплоізоляційного розриву дозволило знизити ефективний коефіцієнт теплопередачі з 0,241 до 0,174 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Температура на поверхні вузлів «стіна-перекриття» підвищилася з 14,3°C (без теплоізоляційного розриву) до 19,4°C (з теплоізоляційним розривом), що суттєво зменшило ризик конденсації. Енергетичне моделювання показало, що встановлення теплоізоляційного розриву дозволяє

зменшити річні теплові навантаження на опалення на 4,5% та теплові втрати через стіни на 26,9%. Водночас, незначне зростання охолоджувального навантаження (близько 0,7%) яке пояснюється тим, що влітку теплонадходження через стіни менш критичні порівняно з тепловтратами взимку. У висновках було підкреслено, що застосування теплоізоляційних розривів при внутрішньому утепленні має суттєвий потенціал для підвищення енергоефективності багатоквартирних будинків, зменшення ризику утворення конденсату та забезпечення відповідності сучасним вимогам щодо майже нульового енергоспоживання (nZEB).

У статті Grudzińska M. та співавторів (2024) [35] досліджено теплові характеристики зон конструктивних з'єднань між дахом і стінами будівель, утеплених сумішшю конопель і вапна (hemp–lime composite). Дослідження було проведено методом двовимірного моделювання теплових потоків у програмі THERM відповідно до стандарту ISO 10211. Аналіз охопив вузли сполучення стіни з дахом (у зоні мауерлату) та вузли у конику даху, із різними варіаціями положення несучого дерев'яного каркасу, ухилами даху та інших. Усі змодельовані теплові містки мали значення лінійної теплопередачі  $\psi$  нижче 0,10 Вт/(м·К), що свідчить про досить високі теплоізоляційні властивості матеріалу. Зменшення ухилу даху призводило до зростання  $\psi$ -значення у зоні стіни-мауерлату, але зменшувало теплові втрати через коник. Стінова конструкція з несучим каркасом, розташованим біля внутрішньої поверхні, демонструвала вищі втрати тепла через містки холоду порівняно із варіантом центрального розташування каркасу. Додатково було виконано розрахунок втрат тепла через умовний двосхилий дах. Встановлено, що теплові містки у зоні стику даху і стін становлять від 10% до 16% від загальних теплових втрат через дах, залежно від ухилу та типу конструкції. Геометрія вузлів (особливо кут ухилу даху) є критичним фактором, що визначає величину лінійних теплових втрат.

## Висновки до розділу 1

Комплексний аналіз нормативних, теоретичних та практичних засад оцінювання енергоефективності будівель, із особливим акцентом на вплив теплопровідних включень (теплових містків) на теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій демонструє, що енергоефективність будівель в Україні регулюється сучасною нормативною базою, гармонізованою з європейськими директивами, зокрема Директивами 2010/31/ЄС та 2024/1275/ЄС. На законодавчому рівні впроваджено вимоги щодо обов'язкової сертифікації енергетичної ефективності будівель, термомодернізації існуючого житлового фонду та розбудови будівель із майже нульовим споживанням енергії (nZEB).

Аналіз національних і міжнародних стандартів засвідчує, що при розрахунках теплопередачі огорожувальних конструкцій особливу увагу слід приділяти впливу їх термічної неоднорідності. Використання коефіцієнтів теплопередачі по основному полю та без урахування теплопровідних включень може призводити до суттєвого недооцінювання фактичних тепловтрат будівель.

Ретельний огляд сучасних вітчизняних та закордонних досліджень показав, що теплопровідні включення у вузлах огорожувальних конструкцій — таких як стики "стіна-перекриття", "стіна-віконний проріз", кути, балконні плити — можуть забезпечувати до 20–40% додаткових тепловтрат залежно від особливостей конструкції. Особливо критичним є вплив балконних перекриттів та зон примикання віконних рам, що підтверджено експериментальними вимірюваннями, тепловізійними обстеженнями та чисельним моделюванням. Водночас вплив теплопровідних включень на рівень енергопотреб будівлі на опалення та охолодження висвітлено недостатньо, що підтверджує актуальність дослідження наведеного в даній роботі.

При порівнянні методів врахування теплопровідних включень спрощені підходи (через поправки  $\Delta U_{\text{тб}}$ ) краще застосовувати лише для попередніх оцінок і часто фактичні втрати тепла можуть бути завищеними. Детальні 2D- і 3D-моделі



теплопередачі дозволяють найбільш точно враховувати вплив містків холоду і повинні використовуватись при проєктуванні енергоефективних будівель.

Оцінка впливу точкових теплопровідних включень, наприклад, кріплень утеплювача, є важливою складовою розрахунків для будівель класу nZEB і пасивних будівель. У роботах вітчизняних і зарубіжних авторів підкреслюється важливість удосконалення конструктивних рішень вузлів примикання, впровадження технологій теплових розривів, використання інноваційних матеріалів із низькою теплопровідністю (наприклад, аерогелів або армованих полімерних матеріалів).

Таким чином, на основі проведеного аналізу можна зробити такі ключові висновки:

- Підвищення енергоефективності будівель неможливе без врахування впливу теплопровідних включень на рівень енергопотреб на опалення та охолодження.
- Для проєктування і реновації будівель слід застосовувати детальні чисельні методи моделювання теплопередачі у вузлах огорожувальних конструкцій.
- Наявні нормативні документи потребують періодичного оновлювання та доповнення каталогів типових вузлів із вказаними  $\Psi$ - і  $\chi$ -значеннями для сучасних будівельних технологій.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення моделей розрахунку теплопровідних включень, розробку нових конструктивних рішень для їх мінімізації та забезпечення їх обов'язкового врахування при визначенні рівня енергоефективності будівель.

## **РОЗДІЛ 2 ОБ'ЄКТИ МОДЕЛЮВАННЯ. МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЧИСЕЛЬНОГО АНАЛІЗУ ТЕПЛОПРОВІДНИХ ВКЛЮЧЕНЬ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

В Україні будівлі становлять один із найбільших секторів енергоспоживання, що зумовлено переважно застарілим житловим фондом із низькими показниками теплоізоляції, неефективними системами опалення та вентиляції, та, відповідно, великими втратами тепла в опалювальний період. Більшість будівель було зведено далеко від сучасних вимог до енергоефективності, а темпи термомодернізації залишаються недостатніми. Для існуючих будівель потенціал зниження кінцевого енергоспоживання може складати до 80% в залежності від типу будівлі та класу енергоефективності після проєкту комплексної термомодернізації [36]. Сектор житлових та громадських будівель, який становить значну частку від загального фонду будівель України відповідно до [37], може слугувати гарним прикладом впровадження заходів з підвищення рівня теплового захисту оболонки будівель для населення України.

### **2.1 Загальні характеристики об'єктів енергетичного моделювання**

Серед заходів з підвищення рівня енергетичної ефективності будівель значну роль відіграє покращення теплового захисту оболонки будівлі та зменшення теплових втрат через різного роду теплопровідні включення. Ефективним інструментом для визначення впливу термічно неоднорідних включень на основні енергетичні показники будівлі є використання динамічного моделювання, яке дає можливість проаналізувати значну кількість показників енергоефективності та рівня теплового комфорту, а також спостерігати за зміною рівня енергоспоживання при зміні різних вхідних даних. Для охоплення більшого спектру будівель України у даному дослідженні було розглянуто громадську будівлю, а саме навчальний заклад, та багатоквартирний житловий будинок.

### 2.1.1 Характеристики громадської будівлі навчального закладу

Одним з об'єктів моделювання, використаного у даному дослідженні, є середня загальноосвітня школа м. Києва. Будівля розташована в I температурній зоні. Школа побудована у 1963 році за типовим проєктом, характерним для закладів освіти у північній частині України. Будівля закладу освіти має Н-подібну форму з однією чотириповерховою та двома одноповерховими секціями «А», «В» та «С» відповідно, схема розташування зображена на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Схема розташування та орієнтація по сторонам світу об'єкта моделювання

У секції «А» розміщені навчальні класи, учительські кімнати, бібліотека, музей, методичні кабінети. У секції «В» знаходиться вхідна група до будівлі, робоче місце обслуговуючого персоналу, великий центральний хол, який сполучає собою секцію з навчальними класами та приміщення їдальні, актової зали тощо. У секції «С» розташований харчовий блок з їдальнею, актова зала, спортивна зала, роздягальні та підсобні приміщення.

У школі навчається та працює близько 600 учнів та 70 робітників відповідно.

Загальна площа будівлі становить 7386,8 м<sup>2</sup>, а загальний об'єм становить 23399,7 м<sup>3</sup>. Середня висота поверху становить 3,0 м. Стіни будівлі складаються з керамічної порожнистої цегли на цементно-піщаному-розчині, зсередини оздоблені шаром штукатурки та пофарбовані, різних товщин за висотою будівлі, 690 та 540 мм відповідно. Зовнішні стіни не утеплені, видимих пошкоджень зовнішньої

оболонки немає.

У чотириповерхової секції наявний неопалювальний технічний поверх. Дах – похила крівля, гідроізоляція якої виконана листовим руберойдом у два (місцями – три) шари. Що стосується даху одноповерхових секцій, то він розташований безпосередньо над опалювальними приміщеннями (суміщене покриття) та виконаний з залізобетонних плит, покритих цементно-піщаною стяжкою.

Під секцією «А» розташований опалювальний підвал, в якому розташований тир, гардероб та приміщення для проведення позакласної активності. Згідно проєкту, вікна з подвійним склінням та дерев'яними рамами. Майже половина вікон замінена на металопластикові з одно- та двокамерним склопакетом. Також в якості світлопрозорих конструкцій застосовуються склоблоки (зони сходів, спортивної зали).

Опалення та гаряче водопостачання подаються централізовано. Система опалення будівлі закрита, однотрубна з верхнім розведенням теплоносія, тепловіддача відбувається від чавунних радіаторів. Термостатичні крани на приладах опалення відсутні. За переважною більшістю радіаторів розміщено рефлектори. Подача теплоносія по стоякам опалення здійснюється розбалансовано, наявно багато повітряних карманів. Трубопровід тепломережі знаходиться в незадовільному стані, та потребує заміни. Індивідуальний тепловий пункт (ІТП) було реконструйовано, схема приєднання – залежна, з триходовим клапаном та циркуляційними насосами на подавальному трубопроводі. Мережева вода в системі опалення має температурний графік 95-70°C. В ІТП здійснюється автоматичне регулювання температури подавальної води, в залежності від температури зовнішнього повітря і теплового навантаження споживачів за допомогою системи керування з погодозалежним контролером. Усі передбачені проєктом реконструкції системи функціонують, трубопроводи в тепловій пункті теплоізовані.

У будівлі наявне холодне водопостачання та водовідведення. Подача води централізована з загальноміських магістральних мереж. Точки забору води знаходяться в справному робочому стані, протікань немає.

Вентиляція приміщень запроектована з примусовим видаленням та

нагнітанням повітря, проте через застарілий стан не функціонує. Вентиляція здійснюється природним шляхом (провітрювання, інфільтрація через нещільності).

### 2.1.2 Характеристики житлової багатоквартирної будівлі

Ще одним з об'єктів моделювання є п'ятиповерховий житловий багатоквартирний будинок прямокутної форми з технічним підпіллям. Відповідно до інформації, вказаної в проєктній документації об'єкту [38], загальна кількість квартир у будинку становить 45. Будівля розташована в I температурній зоні. Основні об'ємно-планувальні характеристики об'єкта такі: кондиціонована площа будівлі — 2371,5 м<sup>2</sup>, кондиціонований об'єм — 6317,7 м<sup>3</sup>. Загальна площа зовнішніх огорожувальних конструкцій становить 2591,2 м<sup>2</sup>. З них площа стін, що межують із зовнішнім повітрям — 1085,4 м<sup>2</sup>. Площа вікон і дверей — 466,80 м<sup>2</sup>. Площа горіщного перекриття — 474,3 м<sup>2</sup>, а перекриття над підвалом — 474,3 м<sup>2</sup>.

Орієнтація будівлі — за сторонами світу наведена на рисунку 2.2.

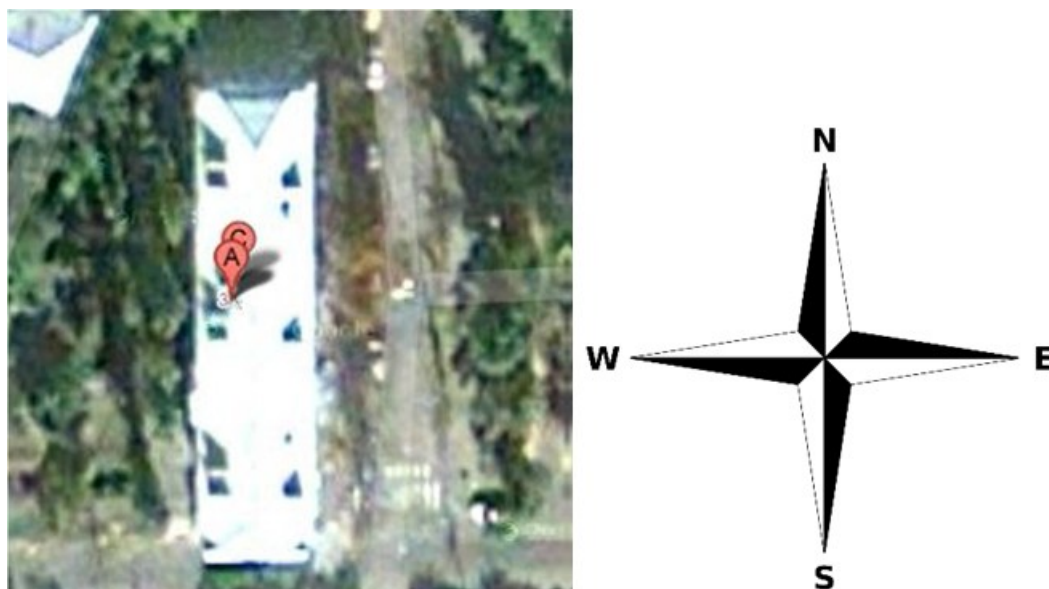


Рисунок 2.2 – Схема розташування та орієнтація по сторонам світу об'єкта моделювання

Зовнішні стіни будівлі виконані з пустотілих керамічних блоків товщиною 380 мм із внутрішнім опорядженням штукатуркою (20 мм). Частина вікон і балконних дверей замінена мешканцями на енергоефективні ПВХ-конструкції з двокамерними

склопакетами.

Горишне перекриття складається із залізобетонної плити, шару шлаку з керамзитом, цементно-піщаної стяжки товщиною 50 мм. Перекриття над підвалом — залізобетонна плита. Цоколь будівлі представлений бетонними блоками ФБС товщиною 500 мм та цегляними блоками товщиною 380 мм із облицюванням керамічною плиткою.

Інженерні системи будівлі включають централізоване теплопостачання, що забезпечується від міських тепломереж через теплообмінний вузол. Система без автоматичного регулювання температури в залежності від погодних умов. Технічний стан опалювальної інфраструктури оцінюється як незадовільний. Опалення підвального рівня не передбачене. Внутрішня мережа опалення представлена вертикальною однотрубною системою з верхнім підведенням теплоносія. Установлені опалювальні прилади — чавунні секційні радіатори. У ряді стояків відсутні обвідні ділянки, підключення здійснено з одного боку, без арматури для регулювання тепловіддачі. Розподільчі трубопроводи проходять через технічний та підвальний рівні, виготовлені зі сталевих водогазопровідних труб. Ізоляційний шар виконано з мінераловатних матеріалів із зовнішнім покриттям, але його стан здебільшого незадовільний.

Система вентиляції — припливно-витяжна з природним спонуканням. Повітрообмін забезпечується через відкривання вікон і дверей. Гаряче водопостачання централізоване: вода готується за межами будинку, циркуляція підтримується зовнішнім джерелом.

## **2.2 Основні програмні продукти для аналізу теплопровідних включень огорожувальних конструкцій**

Для визначення лінійних коефіцієнтів теплопровідних включень ( $\psi$ -коефіцієнтів), доцільно використовувати спеціалізовані програмні засоби. Застосування таких програм є необхідним з кількох причин. По-перше, геометрія будівельних вузлів часто є складною, що робить ручні розрахунки неточними через

необхідність спрощення моделі. По-друге, ручне визначення лінійних теплових втрат є надзвичайно трудомістким, особливо при великій кількості вузлів і варіаціях матеріалів. По-третє, лише програмне моделювання дозволяє точно відобразити розподіл температури в зоні стику, виявити теплові мости та оцінити ризик утворення конденсату або промерзання. Отже, використання спеціалізованих програмних комплексів є не лише доцільним, але й критично важливим для точного визначення лінійних коефіцієнтів теплопровідності в сучасному енергоефективному проектуванні.

Серед найбільш ефективних і популярних програм варто відзначити наступні: THERM, Ansys Fluent, Solido Physibel, HEAT2/HEAT3 та Flixo Energy.

Програма THERM розроблена Національною лабораторією Лоуренса Берклі (США) і базується на методі скінченних елементів [39]. Забезпечення дозволяє розраховувати теплові потоки, поверхневі температури, коефіцієнти теплопередачі, коефіцієнти опору теплопередачі та інші параметри, які характеризують тепловий режим конструкцій будинку. Програма також дозволяє виконувати аналіз ризику конденсації на поверхнях. THERM має графічний інтерфейс, який дозволяє легко створювати і редагувати геометричні моделі теплопровідних включень, задавати матеріали, граничні умови, властивості поверхонь тощо. Програма також має багато стандартних бібліотек матеріалів, форм і типів конструкцій, які можна використовувати для моделювання. Для моделювання та аналізу теплозахисних властивостей світлопрозорих конструкцій, зокрема вікон, дверей і фасадних систем використовують споріднену до THERM програму WINDOW. Програма дозволяє виконувати точні розрахунки коефіцієнта теплопередачі (U-value).

Програма Ansys Fluent CFD analysis - це потужний програмний продукт, який дозволяє моделювати та аналізувати різноманітні явища в області рідинної динаміки [40]. CFD - Computational Fluid Dynamics, або обчислювальна рідинна динаміка. Це галузь науки, яка застосовує чисельні методи для розв'язання рівнянь, що описують поведінку рідин, газів, твердих тіл та їх взаємодію. Програма Ansys Fluent CFD analysis дозволяє моделювати такі явища, як:

- потоки рідин і газів в каналах, трубопроводах, насосах, турбінах, тощо;

- передачу тепла і маси в рідинах, газах, твердих тілах, фазових переходах, хімічних реакціях;
- взаємодію рідин і газів з твердими тілами, поверхнями, структурами, деформаціями.

Програма Solido від компанії Physibel призначена для тривимірного моделювання теплових процесів у будівельних конструкціях і дозволяє точно аналізувати теплові мости, температурні поля та додаткові втрати тепла в складних вузлах [41]. Вона забезпечує розрахунок лінійних ( $\psi$ ) та точкових ( $\chi$ ) коефіцієнтів теплопровідних включень відповідно до стандарту EN ISO 10211. Програма також дозволяє візуалізувати розподіл температур, теплових потоків і ізотерм, а також оцінити ризики виникнення конденсату в місцях понижених температур. Завдяки підтримці складної геометрії, багатошарових матеріалів і імпорту моделей з CAD-програм, Solido є зручним інструментом для інженерів і дослідників.

Програмне забезпечення HEAT2 і HEAT3, розроблене шведською компанією BUILDTECH, призначене для точного двовимірного (HEAT2) та тривимірного (HEAT3) моделювання теплових процесів у будівельних конструкціях [42, 43]. Завдяки відповідності міжнародним стандартам EN ISO 10211, програми активно застосовуються у проєктуванні енергоефективних будівель і наукових дослідженнях. HEAT2 виконує аналіз у площині (2D) і підходить для більшості вузлів огорожувальних конструкцій, тоді як HEAT3 дозволяє моделювати складні просторові вузли, включаючи стики трьох площин — наприклад, перетини стін, перекриттів і покрівель. Основна перевага використання HEAT2/HEAT3 — це можливість отримати надійні та точні результати з урахуванням реальної геометрії конструктивних вузлів, що майже неможливо зробити вручну через складність теплових процесів. Програми також забезпечують високий рівень графічного аналізу, що дозволяє виявити критичні ділянки потенційного утворення конденсату або зони промерзання.

Flixo Energy — це професійна програма для двовимірного аналізу теплопередачі в будівельних конструкціях, яка дозволяє з високою точністю моделювати теплові мости та розраховувати енергетичні характеристики



огороджувальних елементів [44]. Розроблена швейцарською компанією INFOMIND, програма відповідає вимогам європейських стандартів EN ISO 10211 та EN ISO 13788, що робить її придатною як для проектної діяльності, так і для сертифікації будівель за стандартами енергоефективності (наприклад, Passive House). У програмі чудово реалізовано візуалізацію температурних полів, ізотерм і теплових потоків, що дає змогу виявити потенційні проблеми — зони конденсації, промерзання та нераціональних теплових втрат. Програма має функції автоматичного формування звітів і графіків, що полегшує документування результатів розрахунків у технічній документації та наукових роботах.

Для подальшого аналізу теплопровідних включень огороджувальних конструкцій будівель було обрано програмний продукт THERM через те, що він є дуже поширеним серед науковців та інженерів по всьому світу, має зручний графічний інтерфейс та є безкоштовним продуктом.

### **2.2.1 Основні параметри математичної моделі програмного середовища THERM**

Першим етапом у методі скінченних елементів є побудова сітки. Ця сітка складається з обмеженої кількості неперекривних підобластей, відомих як елементи, що покривають всю розрахункову область. Ручне створення якісної сітки скінченних елементів вимагає глибоких знань чисельних методів і є трудомістким процесом. У програмі THERM цей етап автоматизовано за допомогою алгоритму автоматичного створення сітки — Finite Quadtree [45].

Генератор сітки Finite Quadtree базується на процедурі просторової декомпозиції, яка представляє геометричну область як набір неперекривних квадратів, так званих квадрантів, що зберігаються у вигляді ієрархічного дерева. Об'єкт, що підлягає розбиттю на сітку, розміщується у квадратній області, яка повністю його охоплює. Цей квадрат вважається «батьківським» квадрантом і поділяється на чотири «дочірні» квадранти. Подальше розгалуження дерева здійснюється рекурсивно шляхом поділу прикордонних і внутрішніх квадрантів

доти, доки всі підобласті не відповідатимуть геометрії об'єкта. Розподіл триває до того моменту, коли кожен квадрант містить лише один матеріал. Параметр керування сіткою визначає мінімальну кількість поділів, які виконує алгоритм Quadtree. Чим більшим є цей параметр, тим менший максимальний розмір елементів у кінцевій сітці. Після формування дерева перевіряються усі кінцеві (термінальні) квадранти, щоб гарантувати, що різниця рівнів дерева між сусідніми елементами не перевищує одного — це дозволяє уникнути значного контрасту в розмірах суміжних елементів. Останнім кроком алгоритму є перетворення структури quadtree на комбінацію добре сформованих чотирикутників і трикутників. Після створення сітки вона передається модулю розв'язання задачі методом скінченних елементів [46].

Розв'язувач методу скінченних елементів, реалізований у програмі THERM під назвою Conrad, базується на комп'ютерних програмах з відкритим кодом TOPAZ2D та FACET [47,48,49]. Рівняння теплопровідності в двовимірному просторі, що є основним для цього методу, виводиться з загального рівняння енергетичного балансу за умови сталих фізичних властивостей матеріалів і має вигляд частинного диференціального рівняння, наведеного у формулі (2.1).

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_g = 0, \quad (2.1)$$

де  $k$  – теплопровідність Вт/м·К;

$T$  – температура, К;

$x, y$  – просторові координати;

$q_g$  – внутрішня теплогенерація, Вт/м<sup>2</sup>.

При дотриманні наступного набору граничних умов:

$q_f = 0$  – адіабатна гранична умова;

$T = f(x, y)$  – температурна гранична умова;

$q_f = \bar{q}$  – гранична умова відомої густини теплового потоку;

$q_c = h(T - T_\infty)$  – конвективна гранична умова;

$q_r = \varepsilon_i \sigma T_i^4 - \alpha_i H_i$  – радіаційна гранична умова;

Відповідно, узагальнена форма закону Фур'є для обчислення теплового потоку, спрямованого перпендикулярно до поверхні (границі), із урахуванням трьох механізмів передачі тепла:

$$q_f + q_c + q_r = -k \left( \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right), \quad (2.2)$$

Математичною основою методу скінченних елементів (FEM), реалізованого в програмі THERM, є зокрема використання методу зважених залишків (Weighted Residuals Method):

$$\iint_{\Omega} WR dx dy = 0, \quad (2.3)$$

де  $\Omega$  – область розрахунку;

$W$  – вагова функція;

$R$  – залишкова функція (невідповідність апроксимації реальному розв'язку).

Ідея методу полягає не в тому, щоб залишок  $R$  дорівнював нулю всюди, а в тому, щоб його середнє (зважене) по області було мінімальним, що забезпечує наближення до істинного розв'язку. Результат підстановки та інтегрування рівняння теплопровідності з урахуванням граничних умов наведено у формулі 2.4:

$$k \iint_{\Omega} \left( \frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} - W q_g \right) dx dy + \int_{\Gamma_h} W h_c (T - T_{\infty}) d\Gamma_h - \int_{\Gamma_q} W \bar{q} d\Gamma_q - \int_{\Gamma_r} W [\varepsilon_i \sigma (4\bar{T}_i^3 - 3\bar{T}_i^4) - \alpha_i H_i] d\Gamma_r = 0 \quad (2.4)$$

Формула 2.4 – це варіаційна форма рівняння теплопровідності з урахуванням:

- джерел тепла  $q_g$  у середині області;
- конвективного теплообміну на границях  $\Gamma_h$ ;
- заданого теплового потоку на границях  $\Gamma_q$ ;
- радіаційного теплообміну на границях  $\Gamma_r$ , з урахування випромінювання за законом Стефана-Больцмана.

### 2.3 Особливості програмного забезпечення з енергетичного моделювання

Найбільш детальнішим методом дослідження ефективності роботи енергетичних систем будівель є використання динамічних методів [50, 51, 52].

Через достатню складність таких методів серед науковців актуальним є використання спеціального програмного забезпечення при аналізі енергоефективності будівель. Станом на зараз найбільш поширеними та популярними наступні програмні продукти: IDA ICE, IES VE, DesignBuilder, eQuest, EnergyPlus, DOE-2.

Динамічне моделювання дає змогу аналізувати значний спектр показників енергоефективності та теплового комфорту у будівлях та легко відслідковувати рівень енергоспоживання будівель в залежності від зміни різних вхідних факторів. Додатковою перевагою програм з динамічного моделювання є можливість врахування впливу пасивних елементів на енергопотребу та енергоспоживання будівлі, таких як затінення вікон [53] та ін.

DOE-2 представляє собою широко використовуваний безкоштовний програмний продукт для проведення енергетичного аналізу будівель. Цей інструмент здатний прогнозувати річне використання енергії та витрати для будь-якого типу будівлі, для чого використовується деталізований опис плану будівлі, огорожувальних конструкцій, графіків роботи інженерних систем (ОВК, освітлення і т. д.) у поєднанні з погодними даними для проведення погодинних моделювань рівня енергоспоживання будівлі. Особливістю DOE-2 є те, що ця програма вимагає високого рівня досвіду для ефективного використання всіх її можливостей, але водночас надає дослідникам і експертам відповідно значну гнучкість [54].

eQUEST, як повноцінна інтерактивна реалізація DOE-2, вирізняється зручним графічним інтерфейсом та додатковими функціями, які автоматизують складні завдання та спрощують взаємодію користувача з DOE-2. Програма надає можливість імпорту геометрії будівлі з готових архітектурних моделей або створення оболонки будівлі власноруч. Програма дає змогу вводити дані у спрощеному та детальному форматі [55].

EnergyPlus, який базується на кращих підходах моделювання DOE-2 та BLAST, є програмним продуктом, що використовує фізично засновані моделі для опису теплового та масового балансу в будівлі. Кожна програма включає велику кількість

підпрограм, які спільно працюють для моделювання енергетичних потоків у будівлі. EnergyPlus здійснює комплексне моделювання за допомогою трьох основних компонентів: модуль теплового і масового балансу, модуль симуляції систем будівлі та сторонній інтерфейс для створення геометрії будівлі [56, 57].

IDA ICE - це комплексне програмне забезпечення для моделювання енергоефективності будівель, яке дозволяє користувачам моделювати та симулювати різні аспекти будівельної фізики, включаючи системи опалення, охолодження, вентиляції та кондиціонування повітря. Воно включає детальні теплові та енергетичні моделі для оцінки внутрішнього клімату, споживання енергії та екологічного впливу будівель. Крім того, IDA ICE підтримує параметричні дослідження та оптимізацію, що робить його цінним для дослідників, що працюють над дизайном сталих будівель та аналізом енергоефективності [58].

IES VE - це універсальний програмний пакет для аналізу енергоефективності та моделювання енергетичної ефективності будівель. Серед основних його можливостей окрім вже типового аналізу енергоспоживання будівлі за різних умов варто виокремити оцінку інтеграції відновлювальних джерел енергії, викидів вуглецю та аналізу життєвого циклу. Також даний програмний продукт дозволяє ефективно досліджувати кілька сценаріїв проєкту та проводити аналіз чутливості до різних факторів [59].

DesignBuilder є програмним інструментом, який оперує на ядрі симулятора EnergyPlus, серед функціоналу якого можна виокремити здатність аналізу викидів вуглецю, рівнів освітлення та комфорту, а також вимірювання і контроль рівня споживання енергії. DesignBuilder порівнює альтернативні конструкції будівель, використовуючи швидкий спосіб, заснований на функціях та методі порівняння результатів різних аналізів. DesignBuilder поєднує швидке тривимірне моделювання будівель з динамічним моделюванням енергії [60].

При подальшому дослідженні в даній роботі використовувався саме програмний продукт DesignBuider, що має розрахункове ядро EnergyPlus.

### 2.3.1 Особливості математичного апарату EnergyPlus

Ключовим математичним підходом у програмі EnergyPlus, що дозволяє ефективно моделювати теплоперенос у твердих матеріалах без необхідності зберігати всю історію температур у масиві є метод обчислення теплопередачі з використанням функції передавання теплопровідності (Conduction Transfer Function, CTF) [61]. Метод CTF описує тепловий потік через будівельні конструкції (наприклад, стіну), як функцію попередніх температур з обох боків конструкції (внутрішньої та зовнішньої поверхні), а також історії теплових потоків. Загальний вигляд функції передавання наведено у формулі 2.5.

$$q_o''(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta}, \quad (2.5)$$

де  $q_o''(t)$  – тепловий потік на поверхні Вт/м<sup>2</sup>;

$T_{o,t-j\delta}$ ,  $T_{i,t-j\delta}$  – температури зовнішньої та внутрішньої поверхні, К;

$X_j, Y_j$  – коефіцієнти функції передавання теплопровідності CTF;

Формули 2.6 і 2.7 описують розрахунок теплового потоку для внутрішньої та зовнішньої поверхонь відповідно:

$$q_{ki}''(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q_{ki,t-j\delta}'', \quad (2.6)$$

$$q_{ko}''(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q_{ko,t-j\delta}'', \quad (2.7)$$

де  $T_{i,t}$ ,  $T_{i,t-j\delta}$  – температури внутрішньої поверхні (поточна та історичні) розрахунку, К;

$T_{o,t}$ ,  $T_{o,t-j\delta}$  – температури зовнішньої поверхні розрахунку, К;

$q_{ki,t-j\delta}''$ ,  $q_{ko,t-j\delta}''$  – теплові потоки на внутрішній та зовнішній поверхнях у попередні моменти, Вт/м<sup>2</sup>;

$\Phi_j$  – коефіцієнт функції передавання теплового потоку.

Розрахунок коефіцієнтів здійснюється за допомогою числового методу кінцевих різниць (Finite Difference Method), який ділить стіну на невеликі елементи і розраховує теплопередачу через кожен з них.

Тепловий баланс зовнішньої поверхні конструкції в програмі EnergyPlus — один із ключових етапів у моделюванні теплових процесів у будівлі. Формула 2.8

визначає, що сума всіх теплових потоків, які діють на зовнішню поверхню, має бути врівноваженою (рівною нулю):

$$q''_{\alpha sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0, \quad (2.8)$$

де  $q''_{\alpha sol}$  – тепловий потік поглиненого сонячного випромінювання (пряме + розсіяне), Вт/м<sup>2</sup>;

$q''_{LWR}$  – чисте теплове довгохвильове випромінювання між поверхнею та навколишнім середовищем, Вт/м<sup>2</sup>;

$q''_{conv}$  – конвективний тепловий потік між поверхнею та зовнішнім повітрям, Вт/м<sup>2</sup>;

$q''_{ko}$  – теплопровідний тепловий потік, що надходить у товщу стіни з поверхні, Вт/м<sup>2</sup>;

Як видно, усі доданки вважаються додатними, якщо тепловий потік направлений до поверхні, за винятком теплопровідності, яка традиційно вважається додатньою, якщо напрям потоку — ззовні всередину стіни.

У системі енергетичного моделювання EnergyPlus внутрішній тепловий баланс (Inside Heat Balance) є ключовим елементом, який визначає розподіл теплової енергії на внутрішніх поверхнях будівельних конструкцій у межах окремої зони (наприклад, кімнати або приміщення). Цей баланс враховує всі джерела та шляхи передачі тепла, які можуть впливати на поверхню зсередини будівлі, і забезпечує основу для подальшого розрахунку температури повітря та навантаження на системи опалення, вентиляції та кондиціонування.

Загальне рівняння внутрішнього теплового балансу наведено у формулі 2.9 та включає шість основних компонентів: обмін довгохвильовим тепловим випромінюванням між поверхнями зони, короткохвильове випромінювання від джерел освітлення, довгохвильове випромінювання від внутрішніх джерел тепла (обладнання, люди), провідний тепловий потік крізь стіну, сонячне випромінювання, яке проходить через вікна та поглинається поверхнею, а також конвективний теплообмін між поверхнею та повітрям приміщення.

$$q''_{LWX} + q''_{sw} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0, \quad (2.9)$$

де  $q''_{LWX}$  – обмін довгохвильовим випромінюванням між поверхнями всередині

зони, Вт/м<sup>2</sup>;

$q''_{sw}$  – короткохвильове випромінювання від внутрішніх джерел світла, яке досягає поверхні, Вт/м<sup>2</sup>;

$q''_{LWS}$  – довгохвильове випромінювання від обладнання чи людей, що поглинається поверхнею, Вт/м<sup>2</sup>;

$q''_{ki}$  – теплопровідність (провідний тепловий потік) через конструкцію, Вт/м<sup>2</sup>;

$q''_{sol}$  – передане сонячне випромінювання, яке потрапило через вікна та поглинається поверхнею, Вт/м<sup>2</sup>;

$q''_{conv}$  – конвективний теплообмін між поверхнею та повітрям приміщення, Вт/м<sup>2</sup>.

У програмному середовищі EnergyPlus розрахунок теплового балансу вікна (Window Heat Balance Calculation) є важливою складовою загального моделювання енергетичних процесів у будівлі. Він охоплює детальне врахування теплопровідності, обміну випромінюванням, а також конвекції через кожен шар скління та його поверхні. Модель базується на таких припущеннях:

- шари скла вважаються настільки тонкими, що їх теплоємність знехтувана;
- теплопередача вікна розглядається як одновимірна та нормальна до поверхні;
- кожен шар має дві активні поверхні, для яких формуються окремі рівняння теплового балансу.

Для вікна з N шарами скла будується система з 2N нелінійних рівнянь, яка враховує: теплопровідність між шарами, довго- та короткохвильове випромінювання, обмін теплом з навколишнім повітрям.

Наприклад, для першої поверхні скла рівняння матиме вигляд, наведений у формулі 2.10.

$$E_o \varepsilon_1 - \varepsilon_1 \sigma \theta_1^4 + k_1(\theta_2 - \theta_1) + h_o(T_o - \theta_1) + S_1 = 0, \quad (2.10)$$

де  $E_o \varepsilon_1$  – власне теплове випромінювання поверхні;

$\varepsilon_1 \sigma \theta_1^4$  – радіаційна теплопередача між цією поверхнею та іншими (наприклад, сусіднім шаром скла або жалюзі);

$k_1(\theta_2 - \theta_1)$  – теплопровідність крізь шар — передача тепла між двома сусідніми поверхнями (внутрішня та зовнішня сторони шару скла);



$h_o(T_o - \theta_1)$  – конвективний теплообмін із навколишнім середовищем (повітрям або газом між шарами);

$h_o$  — коефіцієнт конвекції;

$T_o$  — температура повітря або газового шару;

$S$  – поглинене сонячне та довгохвильове випромінювання на даній поверхні, яке включає сонячну радіацію, короткохвильове від освітлення, та довгохвильове від людей чи приладів.

У програмі EnergyPlus тепловий баланс повітря в зоні визначає, як змінюється температура повітря у приміщенні під впливом різних джерел тепла, теплообміну з поверхнями та вентиляційних процесів. Цей баланс є центральною складовою динамічного моделювання мікроклімату, комфорту та енергоспоживання. Основне рівняння балансу виглядає так:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys}, \quad (2.11)$$

Де  $C_z \frac{dT_z}{dt}$  – зміна внутрішньої температури зони з часом, де:

$C_z$  – теплоємність зони (Дж/К);

$T_z$  – температура зони (°C);

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$  – сума внутрішніх теплових надходжень від різних джерел, таких як прилади, освітлення та люди;

$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  – конвективний теплообмін від поверхонь зони, де:

$h_i$  – коефіцієнт тепловіддачі для поверхні  $i$  (Вт/м²К);

$A_i$  – площа поверхні  $i$  (м²);

$T_{si}$  – температура поверхні  $i$  (°C);

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$  – теплообмін при міжзонному перемішуванні повітря, де:

$\dot{m}_i$  – масова витрата повітря з зони  $i$  (кг/с);

$C_p$  – питома теплоємність повітря (Дж/кг·К);

$T_{zi}$  – температура повітря в зоні  $i$  (°C);

$\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$  – тепловіддача за рахунок інфільтрації зовнішнього повітря, де:

- $\dot{m}_{inf}$  – масова витрата інфільтраційного повітря (кг/с);
- $T_{\infty}$  – температура зовнішнього повітря (°C);
- $\dot{Q}_{sys}$  – теплота від систем вентиляції та опалення, які додають або віднімають теплоту від зони, Вт.

## Висновки до розділу 2

У межах другого розділу було розглянуто два об'єкти дослідження: громадську будівлю (навчальний заклад у м. Києві) та житловий багатоквартирний будинок. Обидва об'єкти відносяться до типових представників існуючого будівельного фонду України, що характеризується високим рівнем енергоспоживання через недостатню теплоізоляцію, неефективні інженерні системи та наявність численних теплопровідних включень.

Детально проаналізовано геометричні та об'ємно-планувальні характеристики будівель, конструктивні особливості огорожувальних елементів, типи застосованих інженерних систем і їхній технічний стан. Було встановлено, що в обох випадках конструкції огороження не відповідають сучасним вимогам до енергоефективності, що зумовлює підвищені теплові втрати. Особливу увагу приділено аналізу технічного стану систем опалення, вентиляції та гарячого водопостачання, які значною мірою визначають рівень комфорту та споживання енергії в експлуатаційний період.

З метою аналізу теплових характеристик будівельних вузлів із теплопровідними включеннями обґрунтовано доцільність застосування програмного забезпечення, орієнтованого на методи чисельного моделювання. Розглянуто ряд сучасних програмних продуктів — THERM, Solido, HEAT2/HEAT3, Flixo Energy, Ansys Fluent, що дозволяють визначити лінійні ( $\psi$ ) та точкові ( $\chi$ ) коефіцієнти теплопередачі з урахуванням геометрії вузлів, матеріалів, граничних умов та теплофізичних властивостей. Підкреслено переваги

використання програми THERM як універсального інструменту для аналізу теплопровідних включень у 2D-середовищі.

У другій частині розділу детально розглянуто математичну базу програмного продукту THERM — зокрема, реалізацію методу скінченних елементів, алгоритм генерації сітки, а також варіаційну форму рівнянь теплопровідності. Наведено математичне обґрунтування використання методу зважених залишків для побудови розрахункової моделі.

Також проаналізовано можливості та відмінності динамічного енергетичного моделювання будівель на прикладі програм EnergyPlus, DesignBuilder, IDA ICE, IES VE та інших. Особливу увагу приділено математичному апарату EnergyPlus: функції передавання теплопровідності (CTF), розрахунку теплового балансу внутрішніх і зовнішніх поверхонь, вікон, а також моделі повітряного теплового балансу зони. Встановлено, що застосування подібних моделей дозволяє отримати високу точність оцінки теплових втрат, ефективності заходів термомодернізації та прогнозування споживання енергії.

Таким чином, результати, отримані в межах цього розділу, формують теоретичне та методологічне підґрунтя для подальшого проведення чисельного аналізу теплопровідних включень, оцінки впливу термічної неоднорідності на енергетичну ефективність будівель та розробки відповідних інженерних рішень.

## РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ ТЕРМІЧНО НЕОДНОРІДНИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Незважаючи на наявність в Україні широкої нормативної бази з питань енергозбереження та енергоефективності будівель, яка була проаналізована в першому розділі даного дослідження, на державному рівні на даний момент відсутня уніфікована методологія проектування вузлів огороджувальних конструкцій, які б відповідали затвердженим вимогам [13] до будівель з близьким до нульового рівнем енергоспоживання (nZEB). Сучасні проекти часто передбачають використання високоефективних теплоізоляційних матеріалів, новітніх видів скління, комбінованих фасадних систем та рішень, вузлів кріплення вентильованих фасадів тощо. Такі конструктивні елементи не знаходять належного відображення у типових каталогах вузлів огороджувальних конструкцій [15], що значно ускладнює аналітичну роботу з оцінки теплових втрат цих елементів, визначення коефіцієнтів  $\psi$  та  $\chi$ , а отже і в цілому ускладнює проектування енергоефективної теплової оболонки будівель.

У зв'язку з цим виникає потреба у створенні, перевірці та впровадженні нових проектних рішень та підходів, що базуються на чисельному аналізі, валідації через комп'ютерне моделювання, а також адаптації найкращих практик до умов національного будівництва.

Визначення лінійних коефіцієнтів теплопередачі проводилось відповідно до методики описаної в першому розділі даного дослідження та яка міститься в [17] при використанні програмного середовища THERM.

### 3.1 Аналіз та оптимізація вузлів лінійних теплопровідних включень

В даному розділі розглянуто найбільш типові теплопровідні включення які характерні для будівель України. А саме:

- вузол примикання зовнішніх стін з цегли з опорядженням штукатуркою до міжповерхового перекриття;

- вузол кутового сполучення зовнішніх стін з цегли з опорядженням штукатуркою;
- вузол примикання плити перекриття плаского даху до стіни та парапету;
- вузол примикання зовнішніх стін з цегли з опорядженням штукатуркою до балконного перекриття
- вузол примикання віконної конструкції до зовнішніх стін у зоні (зони перемички, підвіконня, рядового сполучення);
- вузол примикання конструкції підлоги над неопалюваним підвалом до стіни цоколя;
- вузол примикання конструкції підлоги по ґрунту до зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією

Теплотехнічні властивості матеріалів приймалися відповідно до Додатку А національного стандарту [15] за умов експлуатації «Б» та наведені для кожного конструктивного вузла, що розглядається, якщо не зазначено інше. Параметри граничних умов застосованих при моделюванні наведені в таблиці 3.1. Дані параметри приймалися з врахуванням коефіцієнтів тепловіддачі згідно Додатку Б [15], а теплотехнічні властивості ґрунту задавалися згідно рекомендацій Інституту Пасивного Будинку США (PHIUS) [62].

Таблиця 3.1 – Граничні умови вузла примикання зовнішніх стін до міжповерхового перекриття

Умовні позначки	Тип конструкції	Коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м <sup>2</sup> · К)	Температура, °С
— — —	Вертикальна, стіна (ззовні)	23	-22,0
— — —	Вертикальна, стіна (всередині)	8,7	+20,0
— — —	Горизонтальна, підлога (всередині)	5,9	+20,0
— — —	Горизонтальна, стеля (всередині)	10	+20,0
— — —	Контакт з ґрунтом	99999	+5,0
— — —	Вісь симетрії (адіабата)	-	-



Таблиця 3.2 – Властивості матеріалів вузла примикання зовнішніх стін до міжповерхового перекриття

Умовні позначки	Матеріал	$\lambda$ , Вт/м·К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	Розчин цементно-піщаний	0,93	1800
2	Утеплювач мінераловатний	0,050	150
3	Цегляна кладка (керамічна)	0,81	1800
4	Дерев'яне покриття підлоги (дуб, поперек волокон)	0,23	700
5	Екструдований пінополістирол	0,037	35
6	Залізобетон	2,04	2500

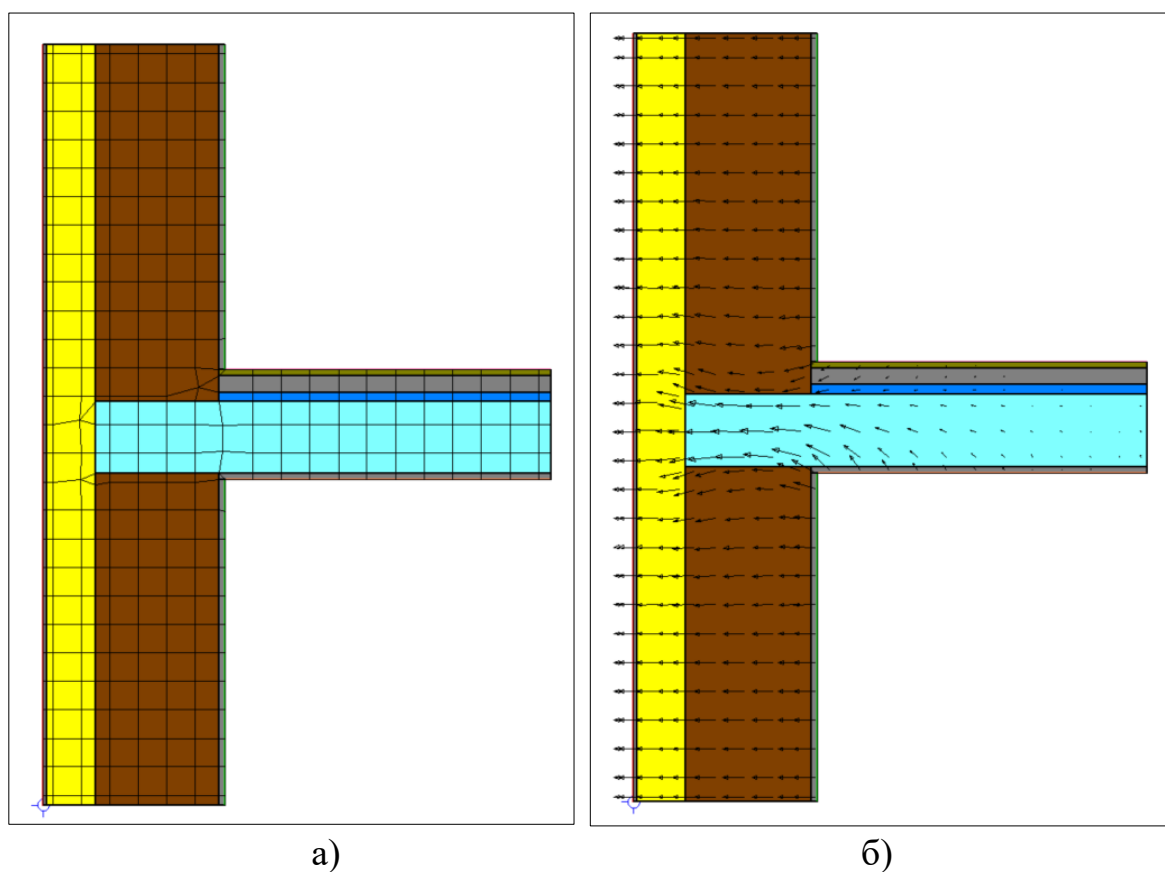


Рисунок 3.2 – Модель конструктивного вузла: а) застосована сітка FEM; б) розподіл векторів густини теплового потоку

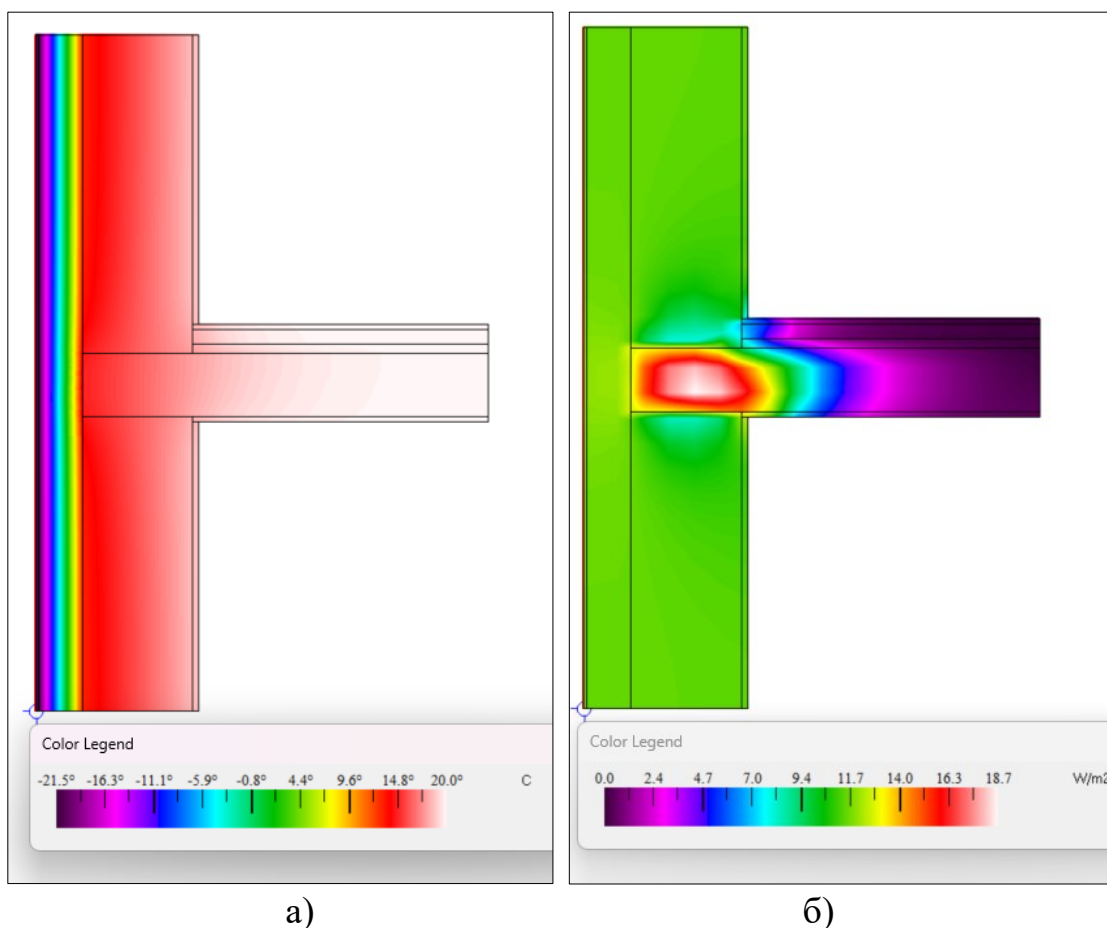


Рисунок 3.3 – Модель конструктивного вузла: а) інфрачервоне зображення розподілу температур; б) розподіл густини теплового потоку

Згідно з методикою, викладеною в розділі 1, для визначення лінійного коефіцієнту теплопередачі  $\psi$  теплопровідного включення окрім теплових характеристик конструктивного вузла (2D модель) необхідно додатково визначити енергетичні показники термічно однорідних ділянок/елементів які формують конструктивний вузол огорожувальної конструкції, що розглядається. Для даного вузла така ділянка (компонент А) зображена на рисунку 3.4.

Варто зауважити, що однорідні компоненти можуть мати однакові характеристики (тип утеплення, товщини, граничні умови) для декількох вузлів конструкцій, тому задля уникнення дубляжу інформації в таких випадках буде зауважено посилання на вже відповідні розглянуті результати моделювання однорідного компонента.



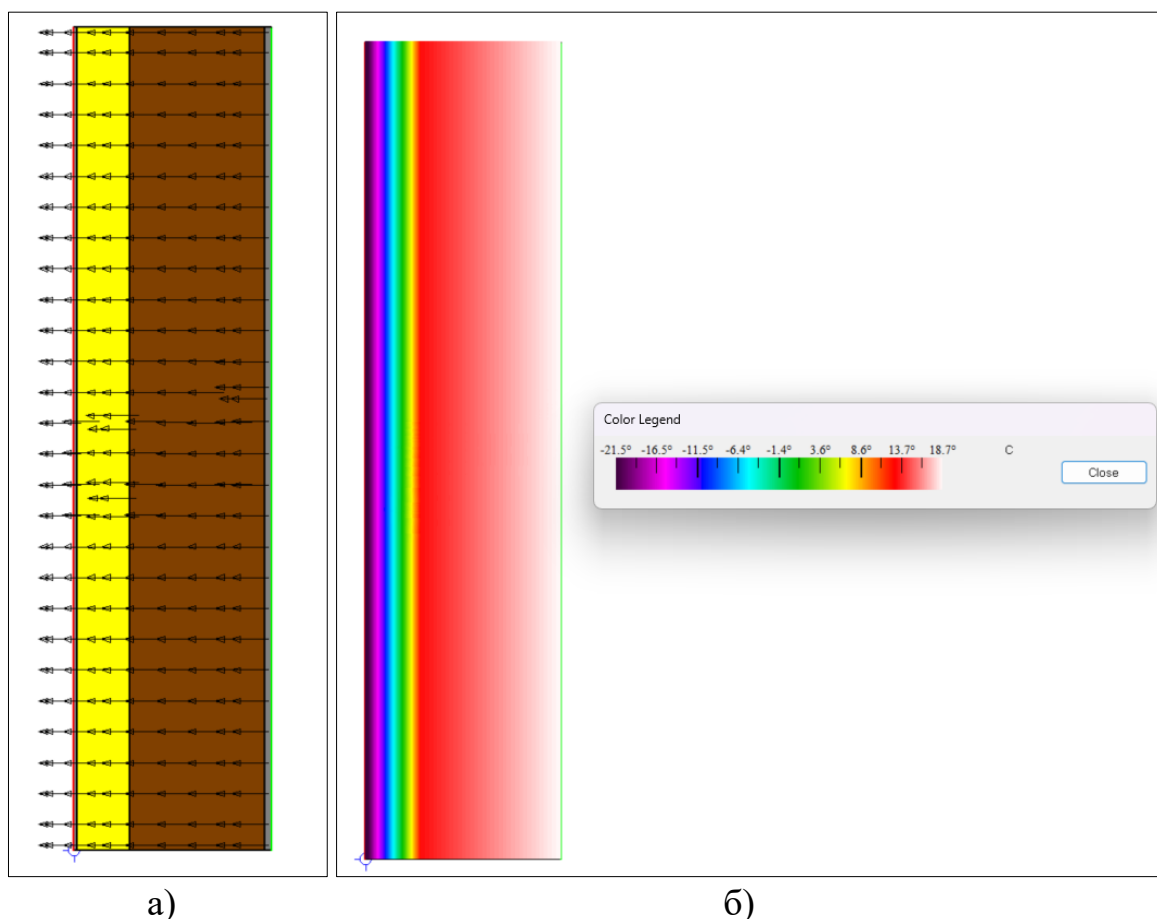


Рисунок 3.4 – Модель однорідного елемента конструктивного вузла: а) розподіл векторів густини теплового потоку; б) інфрачервоне зображення розподілу температур

Після побудови моделі вузла в середовищі THERM та аналізу розподілу температурних полів і теплових потоків, здійснюється розрахунок лінійного коефіцієнта теплопередачі, який характеризує тепловтрати через теплопровідне включення. Відповідно до результатів моделювання, для цілого вузла примикання зовнішніх стін до міжповерхового перекриття було отримано наступні показники:

- коефіцієнт теплопередачі вузла за внутрішніми обмірами:  

$$U_{\text{вузла.внутр}} = 0,1615 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$
- довжина відповідної внутрішньої ділянки:  $l_{\text{вузла внутр.}} = 4,0 \text{ м};$
- коефіцієнт теплопередачі вузла за зовнішніми обмірами:  

$$U_{\text{вузла.зовн}} = 0,2760 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$
- довжина відповідної зовнішньої ділянки:  $l_{\text{вузла зовн.}} = 2,34 \text{ м};$

- різниця температур внутрішнього та зовнішнього середовища  $\Delta T=42,0$  К;
- поверхнева густина теплового потоку:  $\Phi_{\text{внутр}} = \Phi_{\text{зовн}} = 27,13$  Вт/м·К.

Відповідним чином були отримані показники для однорідної ділянки вузла (компонент А):

- коефіцієнт теплопередачі вузла за внутрішніми та зовнішніми обмірами:  
 $U_{\text{вузла.внутр}} = U_{\text{вузла.зовн}} = 0,2732$  Вт/м<sup>2</sup>·К;
- довжина відповідної ділянки:  $l_{\text{вузла внутр.}} = l_{\text{вузла зовн}} = 2,0$  м;
- різниця температур внутрішнього та зовнішнього середовища  $\Delta T=42,0$  К.
- поверхнева густина теплового потоку:  $\Phi_{\text{внутр}} = \Phi_{\text{зовн}} = 22,95$  Вт/м·К.

Отже:

$$L^{2D} = \frac{\Phi}{(\theta_i - \theta_e)} = \frac{27,13}{(42)} = 0,6456 \text{ Вт/м·К},$$

$$\Psi = L^{2D} - \sum U \cdot l = 0,6456 - (0,2732 \cdot 2) = 0,100 \text{ Вт/м·К}.$$

Для зручності, результати моделювання та розрахунків теплопровідного включення були зведені в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати моделювання базового вузла примикання зовнішніх стін з цегли до міжповерхового перекриття

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
2D модель	Внутрішні обміри	0,1615	42,0	4,00	27,13	1,48%
	Зовнішні обміри	0,2760	42,0	2,34	27,13	1,48%
Компонент А, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2732	42,0	2,00	22,95	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2732	42,0	2,00	22,95	0,00%
Результати розрахунку		$L^{2D}$ , (Вт/м·К)	$U \cdot l$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ -середнє, (Вт/м·К)	
Внутрішні обміри		0,6456	0,5464	0,100	<b>0,100</b>	
Зовнішні обміри		0,6456	0,5464	0,100		

Як видно з одержаного результату, отримане значення лінійного коефіцієнту теплопередачі корелюється з каталожним [15] 0,090 Вт/м·К, а можлива розбіжність може бути спричинена застосуванням різних типів матеріалів (цегла, екструдований пінополістирол). Таким чином можна впевнитись що побудована модель, характеристики матеріалів та граничні умови підібрані вірно, а програмний продукт THERM може бути використаний для подальшого моделювання.

Для потенційного застосування в будівлях з близьким до нульового рівнем споживання енергії (nZEB) конструктивний вузол потребує покращення. Для вдосконалення конструктивного вузла пропонується збільшити товщину теплоізоляції до 200 мм (вимоги nZEB в Україні), а також винести цегляну кладку на 50 мм над залізобетонною плитою міжповерхового перекриття (рисунок 3.5).

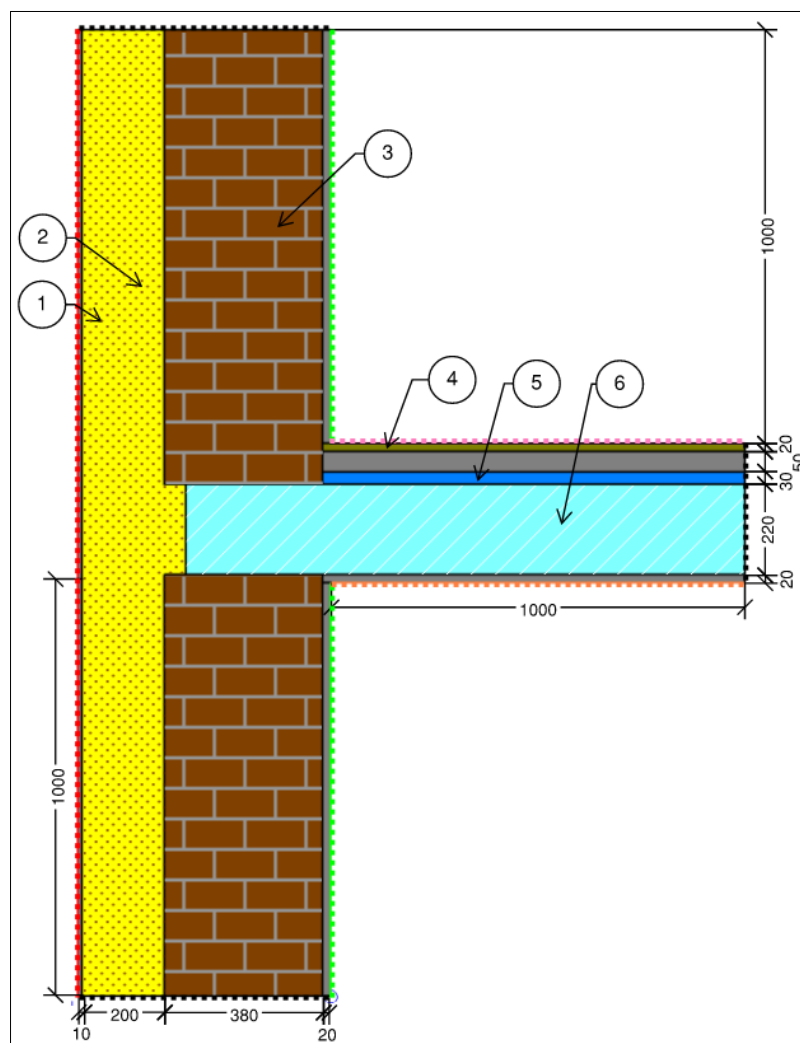


Рисунок 3.5 – Схема покращеного вузла примикання зовнішніх стін до міжповерхового перекриття

Результати моделювання в програмному середовищі THERM зображено на рисунках 3.6 та 3.7.

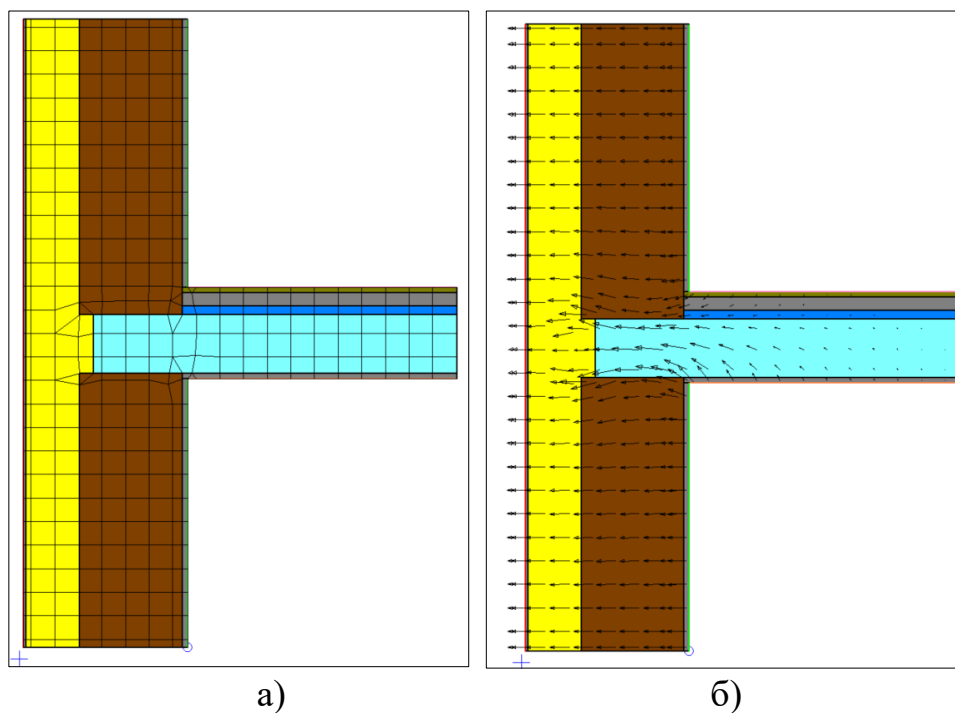


Рисунок 3.6 – Модель покращеного конструктивного вузла: а) застосована сітка FEM; б) розподіл векторів густини теплового потоку

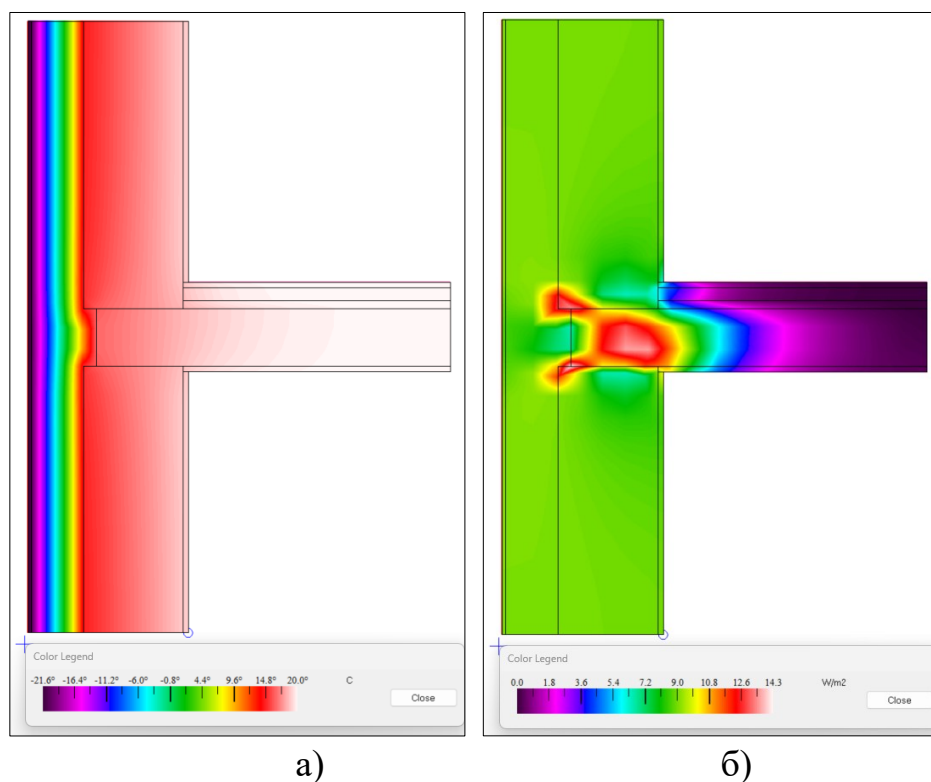


Рисунок 3.7 – Модель покращеного конструктивного вузла: а) інфрачервоне зображення розподілу температур; б) розподіл густини теплового потоку

З одержаних результатів моделювання видно, що величина теплового потоку більш розсіяна у місці безпосереднього заглиблення ізоляції, а на його периферії відслідковується концентрація ізотерм, що зумовлено збільшеною площею контакту теплоізоляційного шару з цеглою.

Однорідна ділянка огорожувальної конструкції (компонент А) наведена на рисунку 3.8.

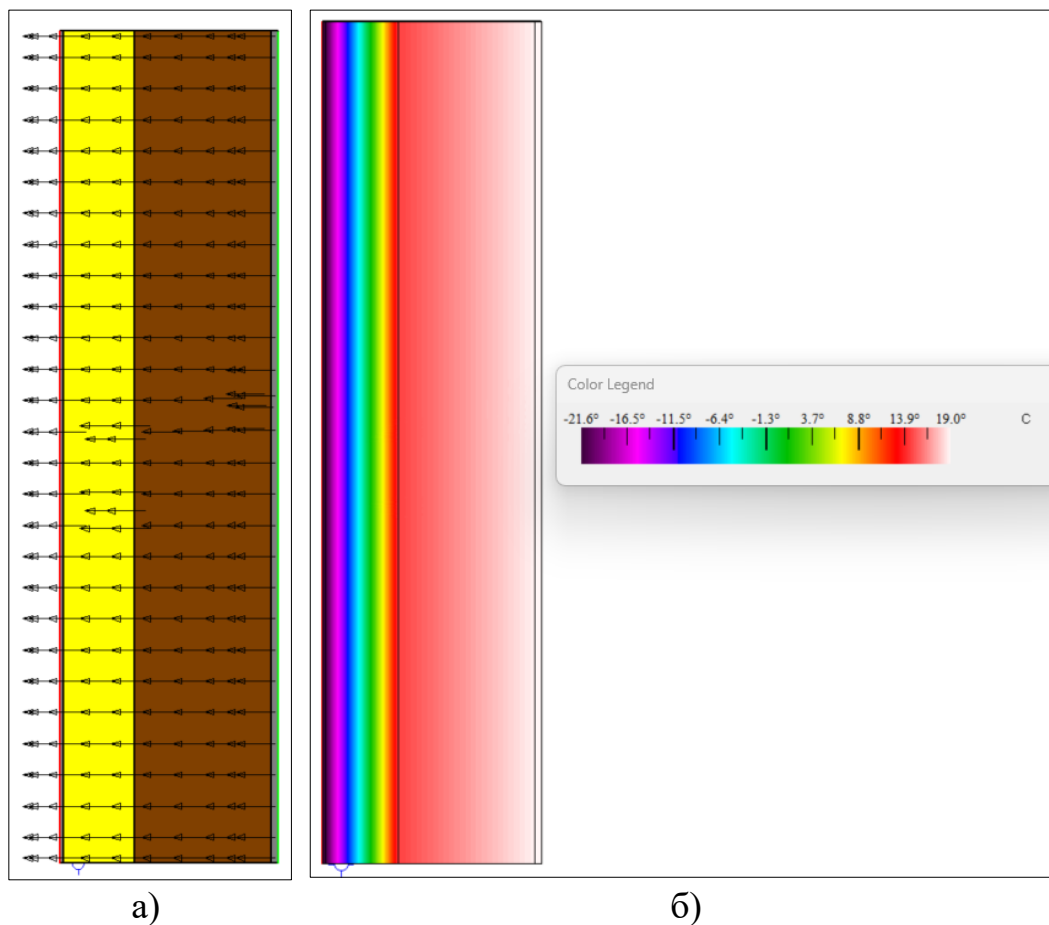


Рисунок 3.8 – Модель покращеного однорідного елемента конструктивного вузла:

а) розподіл векторів густини теплового потоку; б) інфрачервоне зображення розподілу температур

Як видно, характер розподілу густини теплового потоку та температур залишився майже незмінним, що є логічним, адже в однорідній конструкції товщина теплоізоляції збільшилася лише на 50 мм.

Розрахунок енергетичних показників покращеного конструктивного вузла було проведено в повній аналогії до розрахунку базового вузла. Результати зведені до таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати моделювання покращеного вузла примикання зовнішніх стін з цегли до міжповерхового перекриття

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
2D модель	Внутрішні обміри	0,1251	42,0	4,00	21,02	1,48%
	Зовнішні обміри	0,2138	42,0	2,34	21,01	1,48%
Компонент А, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2146	42,0	2,00	18,03	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2146	42,0	2,00	18,03	0,00%
Результати розрахунку		$L^{2D}$ , (Вт/м·К)	$U \cdot l$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ -середнє, (Вт/м·К)	
Внутрішні обміри		0,5004	0,4292	0,071	<b>0,071</b>	
Зовнішні обміри		0,5003	0,4292	0,071		

На підставі результатів чисельного моделювання покращеного вузла було встановлено, що величина лінійного коефіцієнта теплопередачі  $\psi$  зменшилося на 29%, з 0,100 до 0,071 Вт/(м·К). Це свідчить про суттєве зниження теплових втрат через конструктивне включення внаслідок впроваджених удосконалень, зокрема — покращення теплоізоляційної безперервності у зоні примикання. Отриманий результат підтверджує ефективність конструктивної модернізації вузла з точки зору термічного захисту та енергоефективності

### 3.1.2 Вузол кутового сполучення зовнішніх стін з цегли з опорядженням штукатуркою



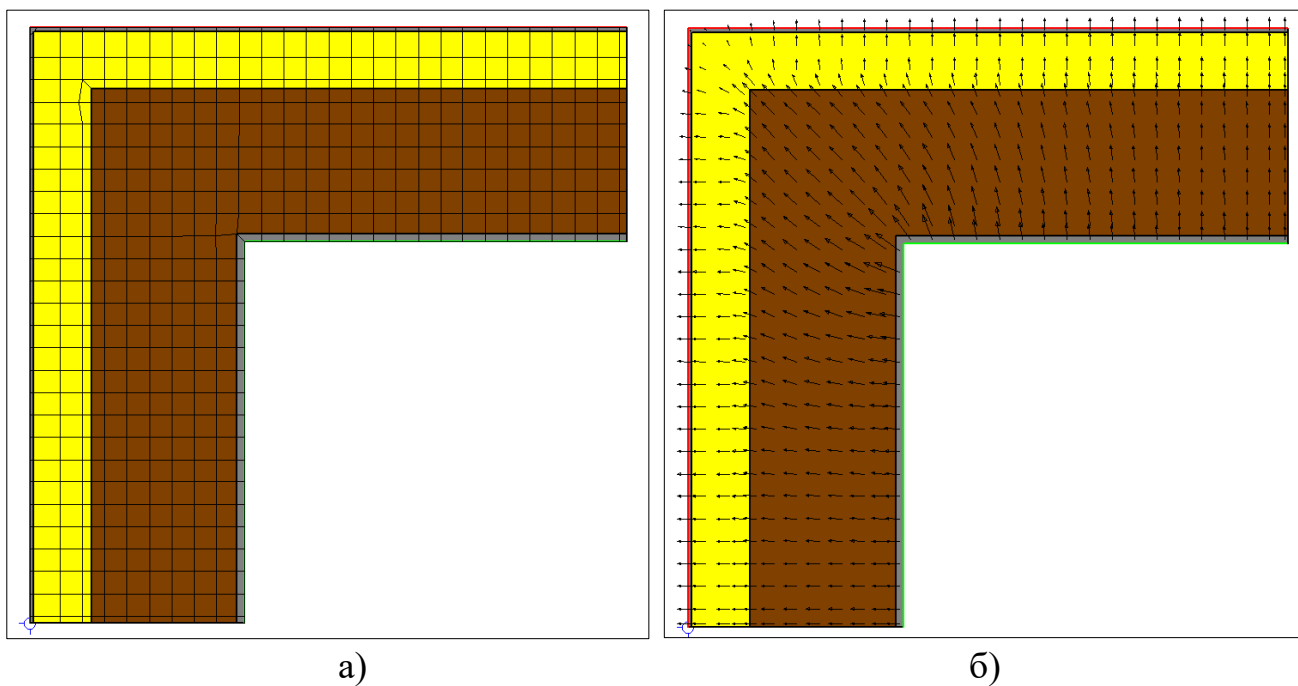


Рисунок 3.10 – Модель конструктивного вузла: а) застосована сітка FEM; б) розподіл векторів густини теплового потоку

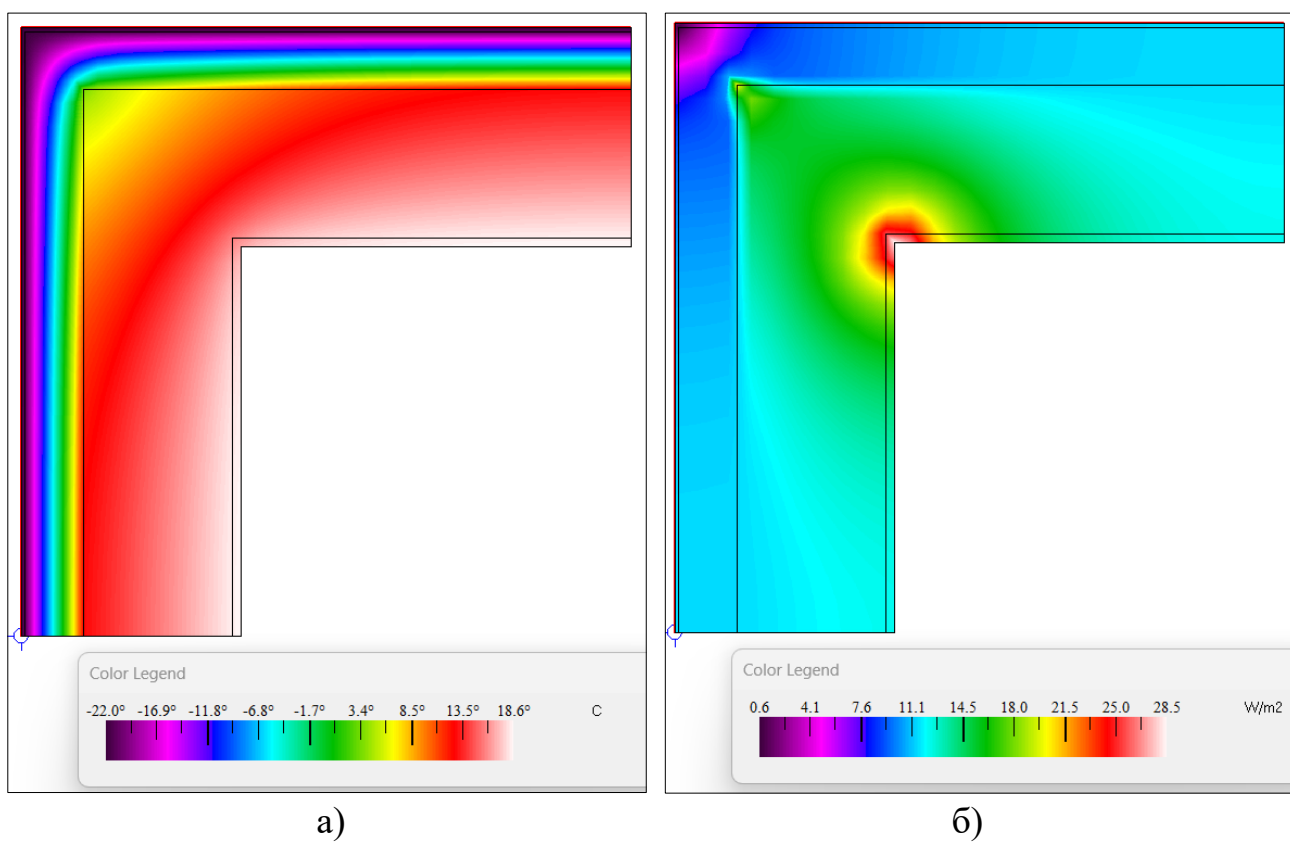
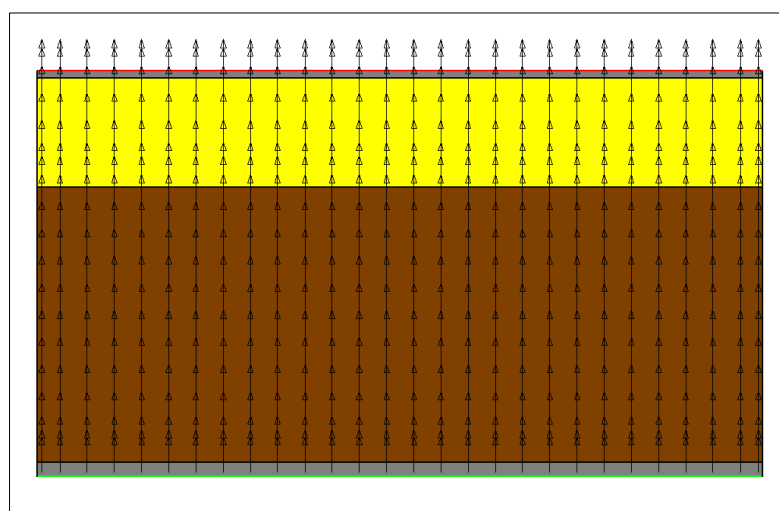


Рисунок 3.11 – Модель конструктивного вузла: а) інфрачервоне зображення розподілу температур; б) розподіл густини теплового потоку

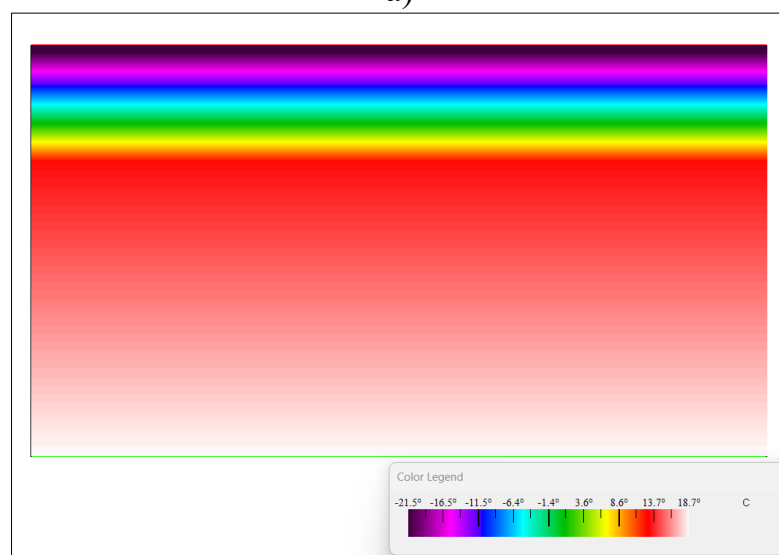


З результатів моделювання помітно, що у внутрішньому куті конструкції (в зоні з'єднання стін) спостерігається локальне підвищення теплового потоку, що позначено жовтим і червоним кольорами. Це свідчить про наявність вираженого містка холоду. Найвищі значення густини теплового потоку сягають понад  $25 \text{ Вт/м}^2$ , що вказує на необхідність оптимізації вузла з метою зменшення тепловтрат і попередження ризику конденсації на внутрішній поверхні конструкції.

На рисунку 3.12 зображено результати моделювання термічно однорідних ділянок (компоненти А, Б) огорожувальної конструкції.



а)



б)

Рисунок 3.12 – Модель однорідного елемента конструктивного вузла: а) розподіл векторів густини теплового потоку; б) інфрачервоне зображення розподілу температур

Після побудови моделі вузла в середовищі THERM та аналізу розподілу температурних полів і теплових потоків, було проведено розрахунок лінійного коефіцієнта теплопередачі. Результати моделювання та розрахунків зведено в таблицю 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати моделювання базового вузла кутового сполучення зовнішніх стін

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
2D модель	Внутрішні обміри	0,3639	42,0	2,00	30,57	3,68%
	Зовнішні обміри	0,2332	42,0	3,12	30,56	3,68%
Компонент А, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2732	42,0	1,00	11,47	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2732	42,0	1,00	11,47	0,00%
Компонент Б, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2732	42,0	1,00	11,47	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2732	42,0	1,00	11,47	0,00%
Результати розрахунку		$L^{2D}$ , (Вт/м·К)	$U \cdot l$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ -середнє, (Вт/м·К)	
Внутрішні обміри		0,7278	0,5464	0,181	<b>0,181</b>	
Зовнішні обміри		0,7276	0,5464	0,181		

На основі чисельного моделювання температурного поля у вузлі кутового з'єднання зовнішніх стін з утепленням мінераловатною плитою товщиною 150 мм було визначено значення лінійного коефіцієнта теплопередачі  $\psi = 0,181$  Вт/(м·К). Це свідчить про наявність вираженого теплопровідного включення у кутовій зоні, що зумовлено геометричною неоднорідністю конструкції. Незважаючи на достатню товщину утеплення, кутова конфігурація спричиняє зосередження

теплового потоку, що потребує подальшого удосконалення вузла з метою зниження тепловтрат і забезпечення вимог до енергоефективності.

Для вдосконалення конструктивного вузла пропонується збільшити товщину теплоізоляційного шару до 200 мм (рисунок 3.13).

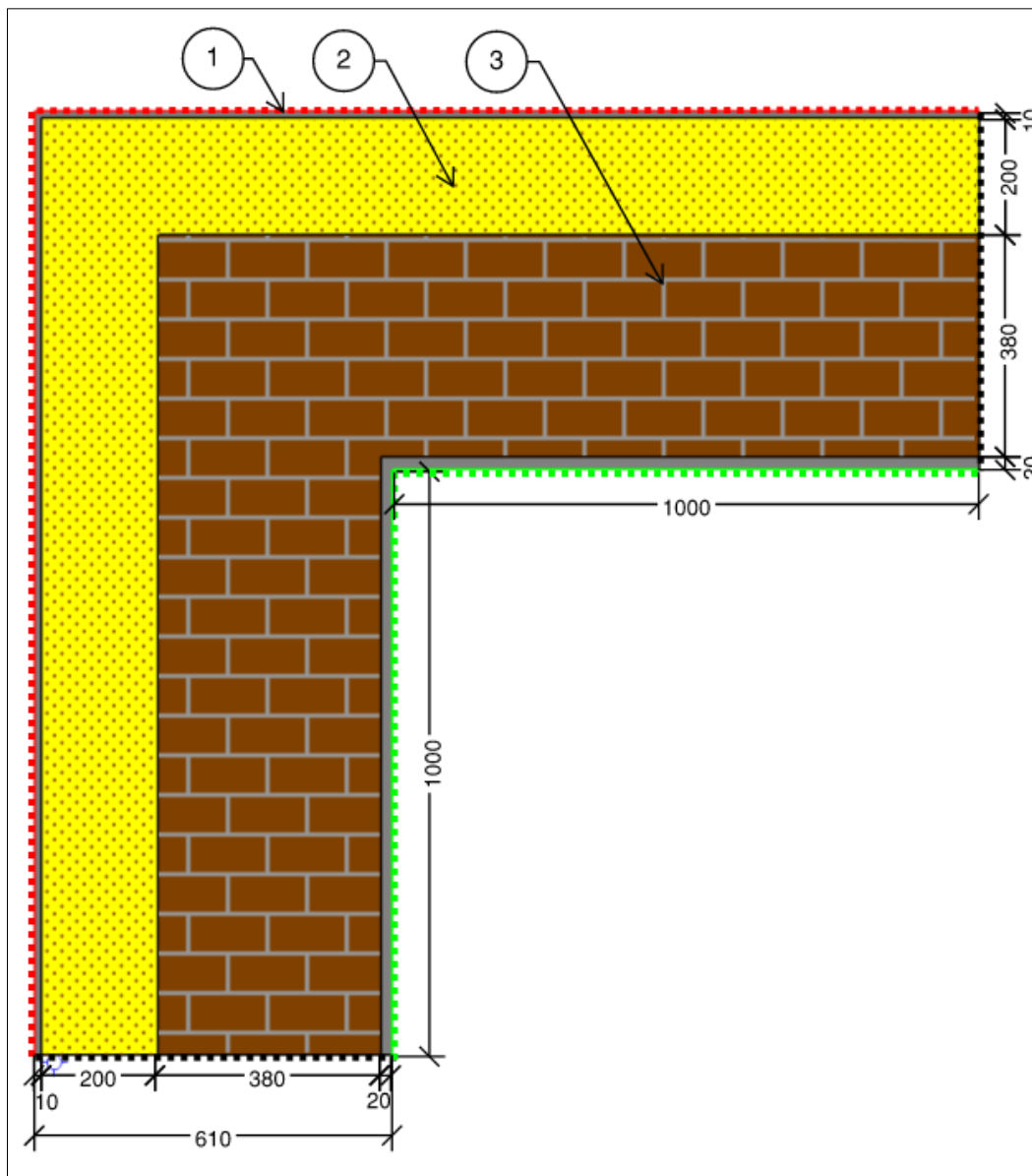


Рисунок 3.13 – Схема покращеного вузла примикання зовнішніх стін до міжповерхового перекриття

Теплотехнічні властивості матеріалів та параметри граничних умов не відрізняються від базової конструкції розглянутої раніше та вказані в таблицях 3.1 і 3.5. Результати моделювання в програмному середовищі THERM зображено на рисунках 3.14 та 3.15.

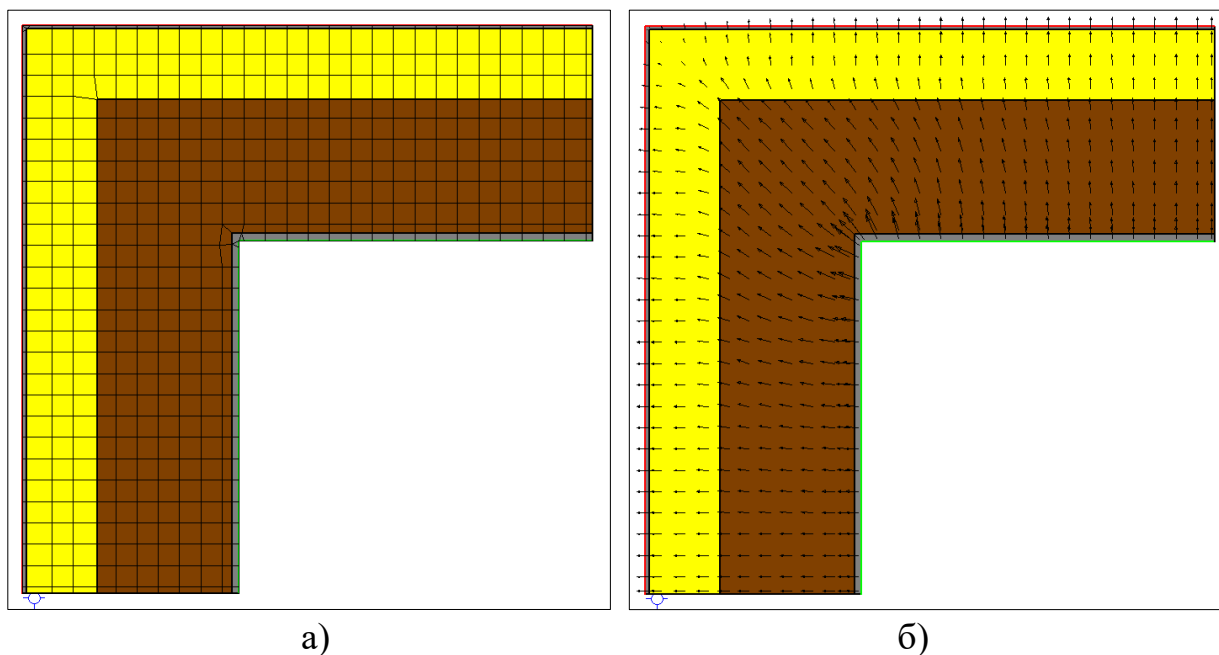


Рисунок 3.14 – Модель покращеного конструктивного вузла: а) застосована сітка FEM; б) розподіл векторів густини теплового потоку

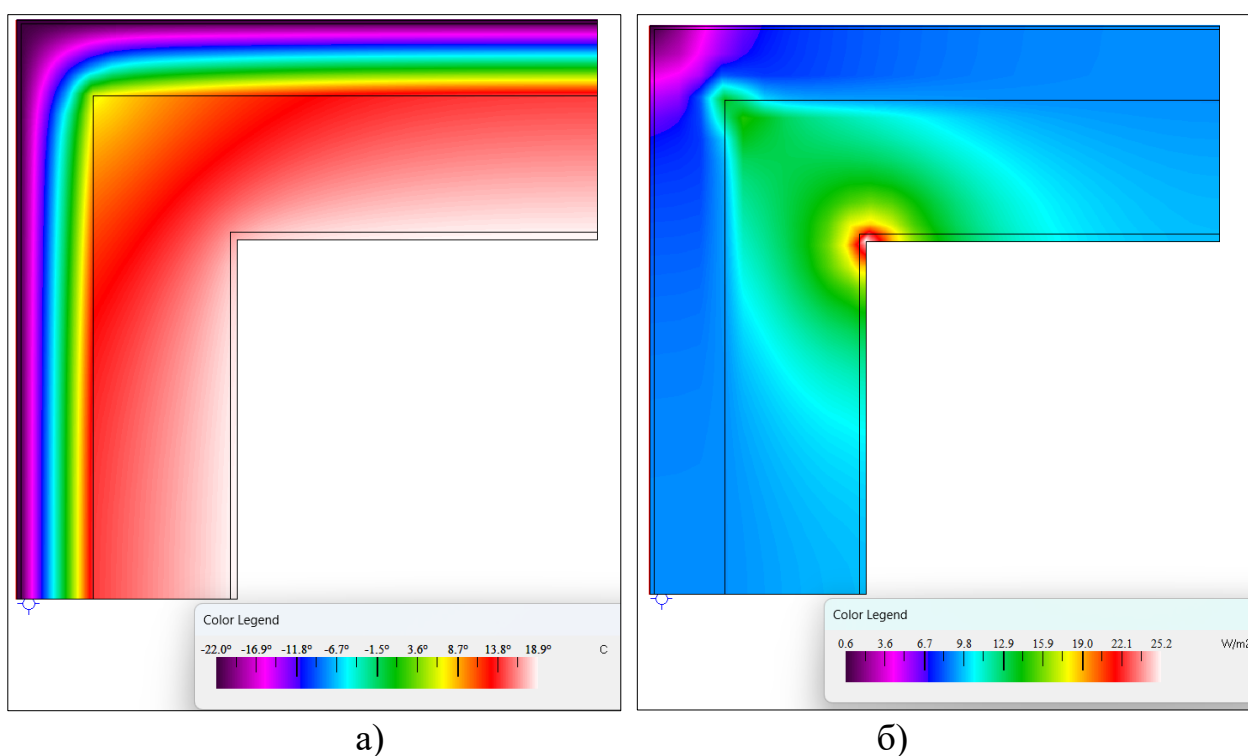
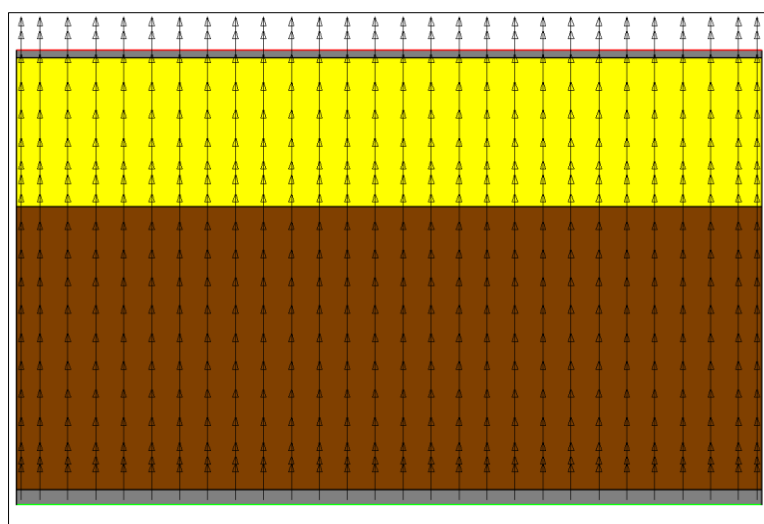


Рисунок 3.15 – Модель покращеного конструктивного вузла: а) інфрачервоне зображення розподілу температур; б) розподіл густини теплового потоку

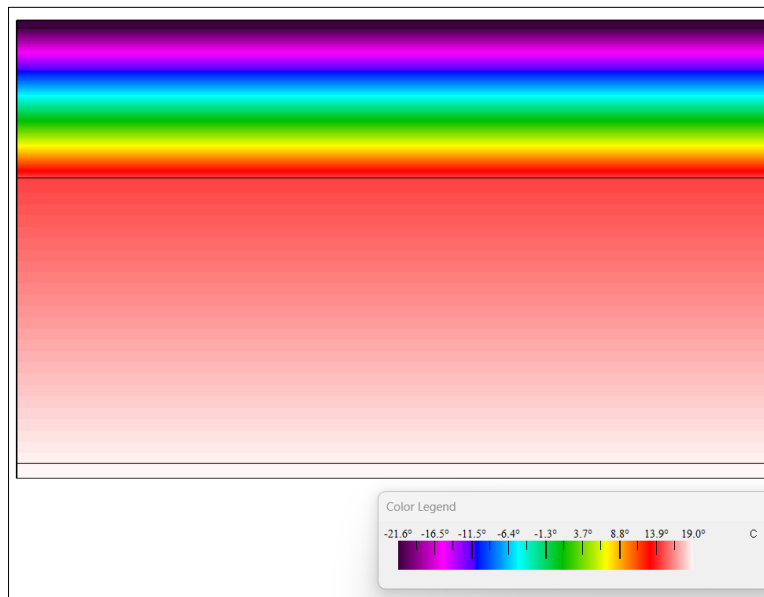
З одержаних результатів моделювання видно, що характер розподілу температур та теплового потоку зберігається, і для радикального зменшення впливу

теплопровідного включення необхідно збільшувати товщину ізоляції саме в куті, що є більш складним та нетиповим методом при будівництві нових будівель, а особливо, існуючих.

Однорідні ділянки (компоненти А і Б) огорожувальної конструкції наведені на рисунку 3.16.



а)



б)

Рисунок 3.16 – Модель покращеного однорідного елемента конструктивного вузла: а) розподіл векторів густини теплового потоку; б) інфрачервоне зображення розподілу температур

Результати розрахунку енергетичних показників покращеного конструктивного вузла зведені до таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Результати моделювання покращеного вузла примикання зовнішніх стін до міжповерхового перекриття

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
2D модель	Внутрішні обміри	0,2921	42,0	2,00	24,54	4,09%
	Зовнішні обміри	0,1814	42,0	3,22	24,53	4,09%
Компонент А, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2146	42,0	1,00	9,01	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2146	42,0	1,00	9,01	0,00%
Компонент Б, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2146	42,0	1,00	9,01	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2146	42,0	1,00	9,01	0,00%
Результати розрахунку		$L^{2D}$ , (Вт/м·К)	$U \cdot l$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ -середнє, (Вт/м·К)	
Внутрішні обміри		0,5842	0,4292	0,155	<b>0,155</b>	
Зовнішні обміри		0,5841	0,4292	0,155		

У результаті чисельного аналізу встановлено, що збільшення товщини теплоізоляційного шару до 200 мм в зоні кутового з'єднання зовнішніх стін сприяло зменшенню лінійного коефіцієнта теплопередачі  $\psi$  на 14,4 % з 0,181 до 0,155 Вт/(м·К). Це свідчить про підвищення теплозахисної ефективності вузла. Як видно, застосування більшої товщини утеплювача це ефективний захід зниження інтенсивності теплопередачі через теплопровідні включення.

### 3.1.3 Вузол примикання плити перекриття плоского даху до стіни та парапету



Таблиця 3.8 – Властивості матеріалів вузла примикання плити перекриття плаского даху до стіни та парапету

Умовні позначки	Матеріал	$\lambda$ , Вт/м·К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	Розчин цементно-піщаний	0,93	1800
2	Утеплювач мінераловатний	0,050	150
3	Цегляна кладка (керамічна)	0,81	1800
4	Бетон на гравії або щебні з природного каменю	1,86	2400
5	Утеплювач мінераловатний	0,053	200
6	Залізобетон	2,04	2500

Наведений вище базовий конструктивний вузол було змодельовано в програмному середовищі THERM. Результати моделювання зображено на рисунках 3.18 та 3.19.

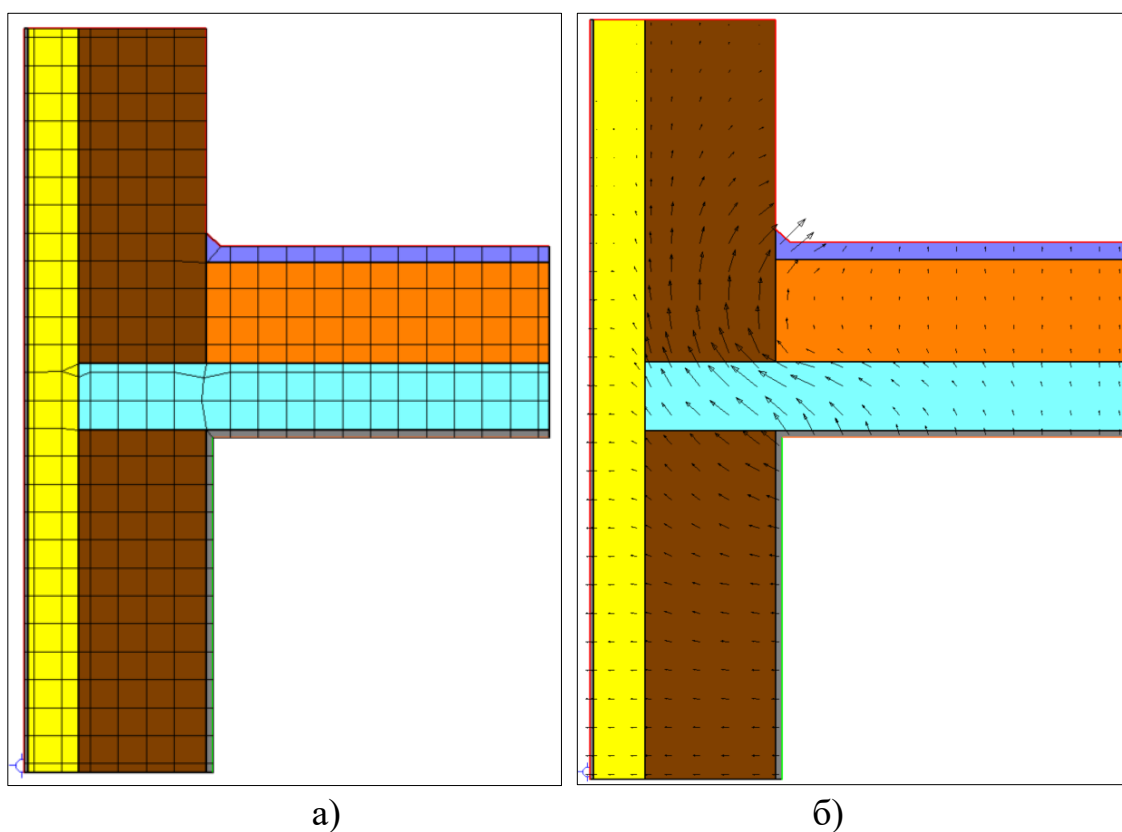


Рисунок 3.18 – Модель конструктивного вузла: а) застосована сітка FEM; б) розподіл векторів густини теплового потоку



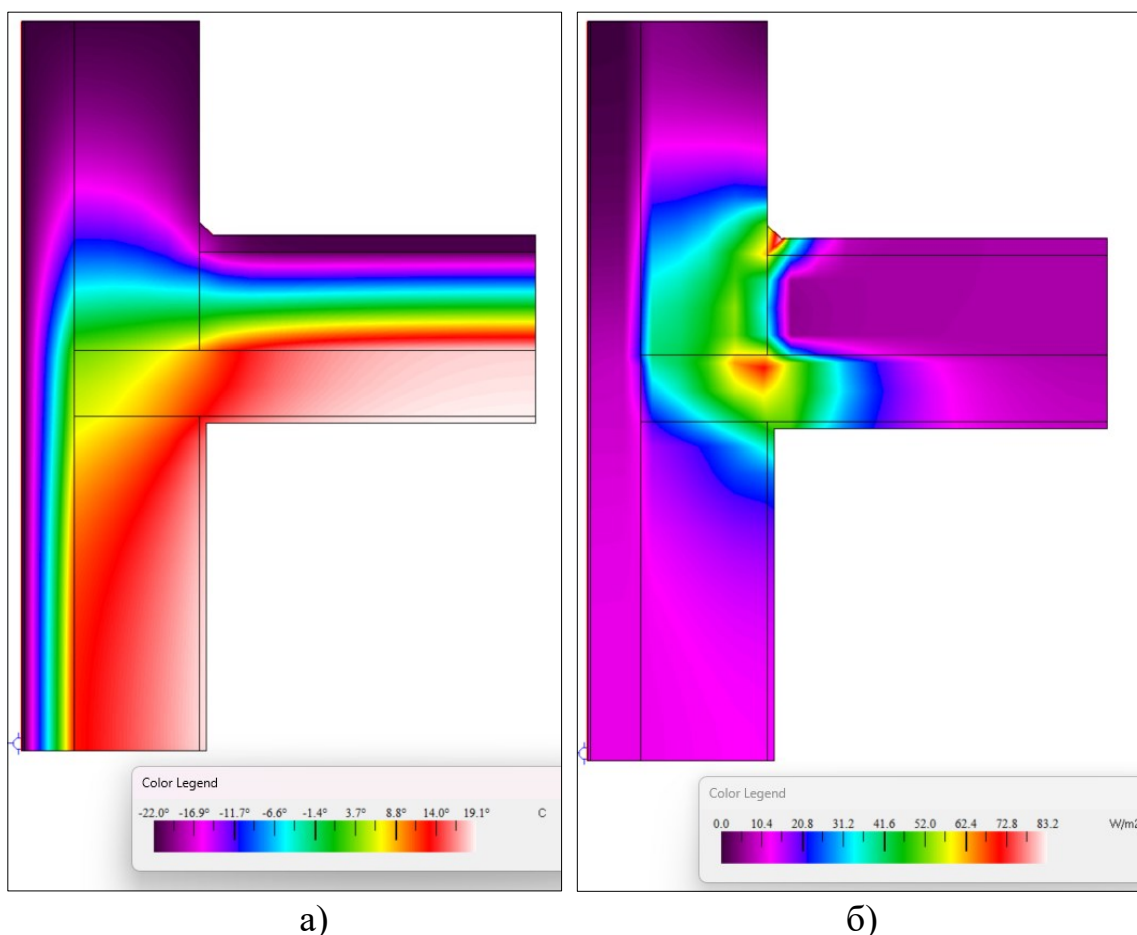
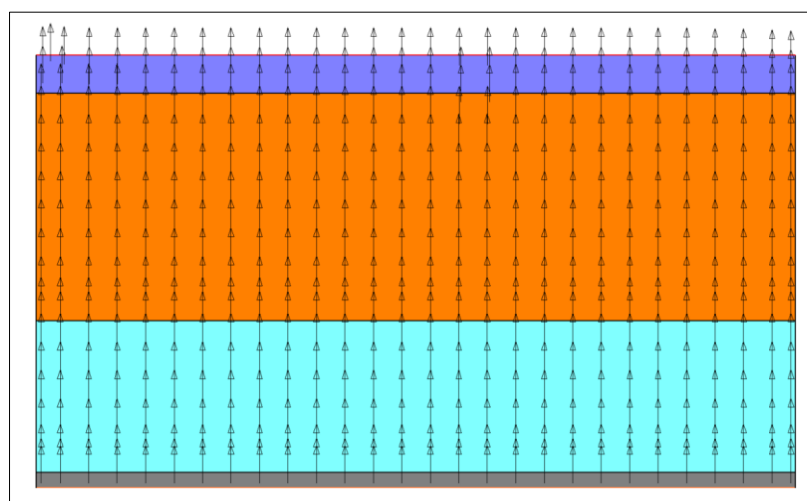


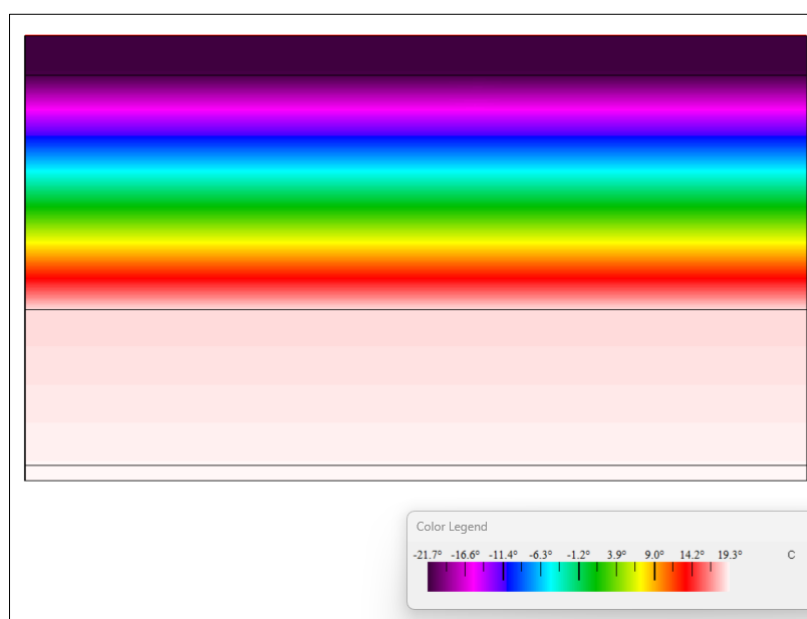
Рисунок 3.19 – Модель конструктивного вузла: а) інфрачервоне зображення розподілу температур; б) розподіл густини теплового потоку

З результатів моделювання видно, що є наявність вираженого теплопровідного включення, яка підтверджується значною концентрацією густини теплового потоку в зоні з'єднання конструкцій. Максимальні значення густини теплового потоку досягають понад  $80 \text{ Вт/м}^2$ , що значно перевищує показники для однорідної ділянки огорожувальної конструкції. Серед причин появи містка холоду є порушення цілісності теплозахисної оболонки будівлі в зоні примикання перекриття та відсутність терморозриву між конструктивними елементами.

На рисунку 3.20 зображено результати моделювання термічно однорідної ділянки огорожувальної конструкції – компонент А (дах).



а)



б)

Рисунок 3.20 – Модель однорідного елемента конструктивного вузла: а) розподіл векторів густини теплового потоку; б) інфрачервоне зображення розподілу температур

Інша термічно однорідна ділянка огорожувальної конструкції — компонент Б (стіна) — є ідентичною тій, що розглянута в п. 3.1.1.

Після побудови моделі вузла в середовищі THERM та аналізу розподілу температурних полів і теплових потоків, було проведено розрахунок лінійного коефіцієнта теплопередачі. Результати моделювання та розрахунків були зведені в таблицю 3.9.

Таблиця 3.9 – Результати моделювання базового вузла примикання плити перекриття плоского даху до стіни та парапету

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
2D модель	Внутрішні обміри	0,4522	42	2,00	37,98	7,93%
	Зовнішні обміри	0,2057	42	4,40	37,98	7,93%
Компонент А, однорідний						
Дах	Внутрішні обміри	0,1681	42,0	1,00	7,06	0,00%
	Зовнішні обміри	0,1681	42,0	1,00	7,06	0,00%
Компонент Б, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2732	42,0	1	11,47	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2732	42,0	1,00	11,47	0,00%
Результати розрахунку		$L^{2D}$ , (Вт/м·К)	$U \cdot l$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ -середнє, (Вт/м·К)	
Внутрішні обміри		0,9044	0,4413	0,463	<b>0,463</b>	
Зовнішні обміри		0,9043	0,4413	0,463		

На основі чисельного моделювання температурного поля у вузлі примикання плити перекриття плоского даху до стіни та парапету було отримано значення лінійного коефіцієнта теплопередачі  $\psi = 0,463$  Вт/(м·К). Результати моделювання підтверджують, що вузол у такій конфігурації не забезпечує належного теплозахисту, створюючи умови для можливого переохолодження внутрішніх поверхонь та підвищення енергоспоживання будівлі. Для покращення показника  $\psi$  доцільно застосувати збільшену зовнішню теплоізоляцію, термоізоляційні вставки або елементи зниженої теплопровідності на ділянці стику (рисунок 3.21).

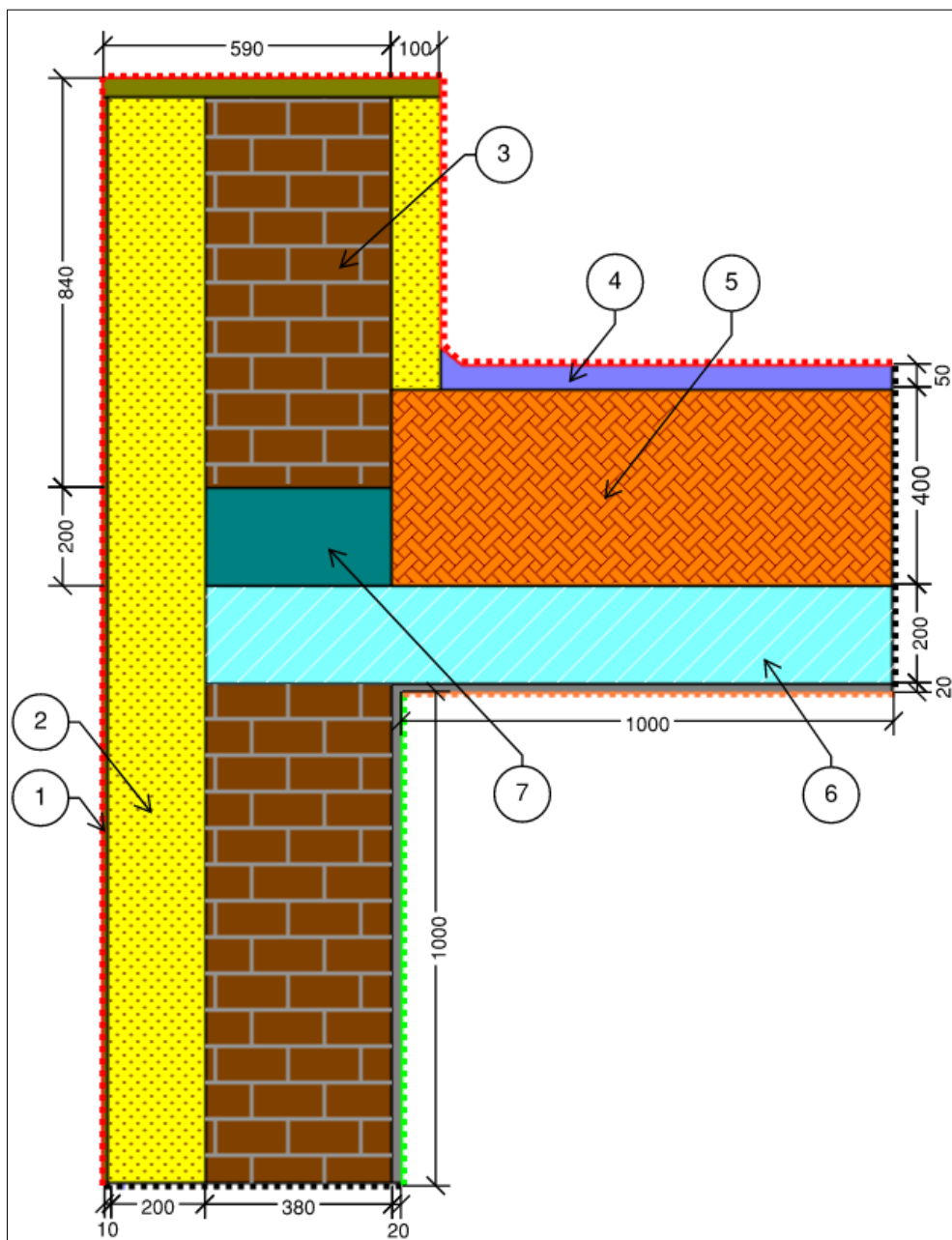


Рисунок 3.21 – Схема покращеного вузла примикання плити перекриття плоского даху до стіни та парапету

Запропоновано збільшення товщини ізоляції зовнішньої стіни та безпосередньо над перекриттям до 200 мм та 400 мм відповідно, використано теплоізоляційний блок з піноскла між цегляною кладкою парапету та плитою перекриття, а також додана тепла ізоляцію з внутрішньої сторони парапету. Теплотехнічні властивості матеріалів вказано в таблиці 3.10, параметри граничних умов не відрізняються від базової конструкції розглянутої раніше. Результати моделювання наведено на рисунках 3.22 та 3.23.

Таблиця 3.10 – Властивості матеріалів вузла примикання плити перекриття плаского даху до стіни та парапету

Умовні позначки	Матеріал	$\lambda$ , Вт/м·К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	Розчин цементно-піщаний	0,93	1800
2	Утеплювач мінераловатний	0,050	150
3	Цегляна кладка (керамічна)	0,81	1800
4	Бетон на гравії або щебні з природного каменю	1,86	2400
5	Утеплювач мінераловатний	0,053	200
6	Залізобетон	2,04	2500
7	Блок з піноскла	0,051	120

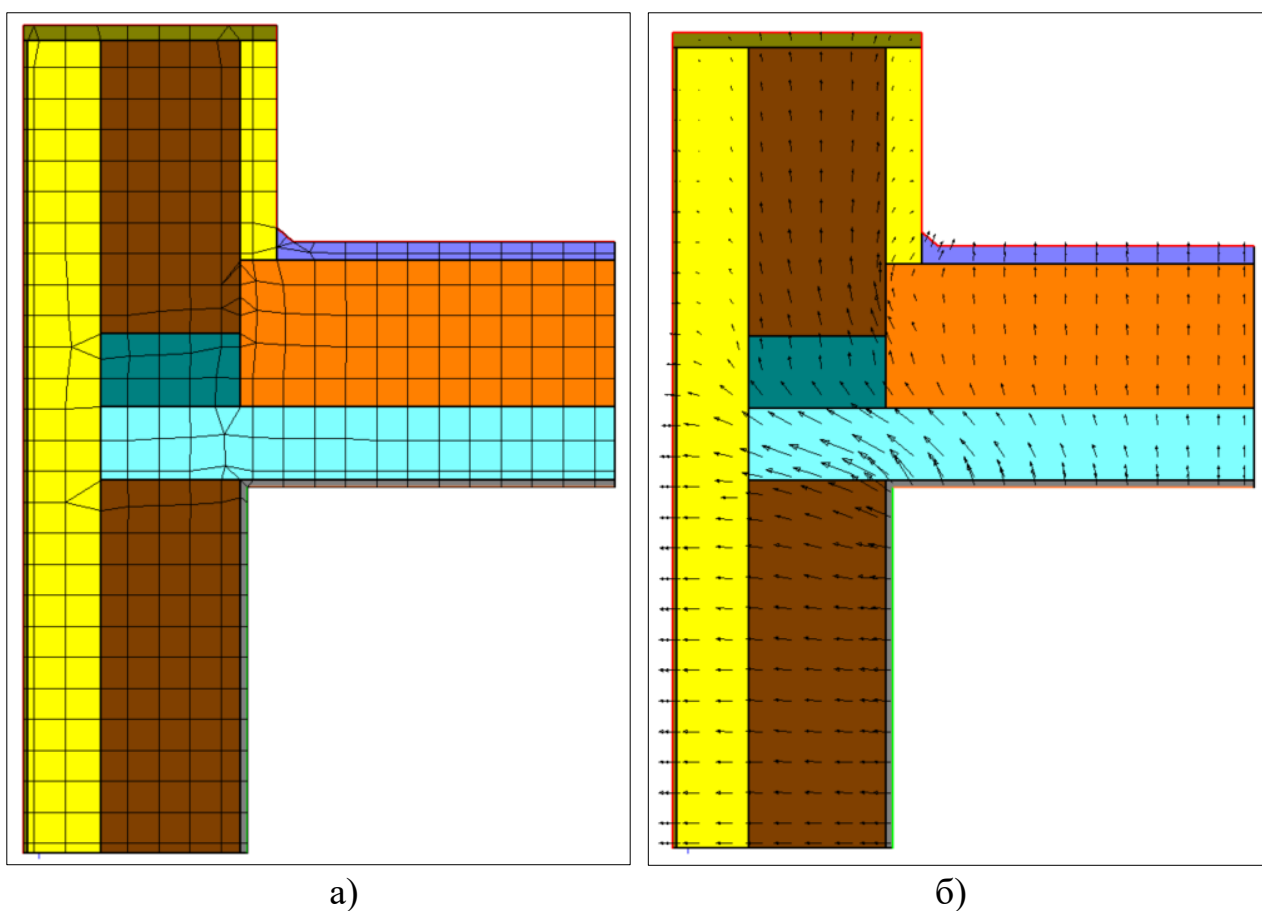


Рисунок 3.22 – Модель покращеного конструктивного вузла: а) застосована сітка FEM; б) розподіл векторів густини теплового потоку

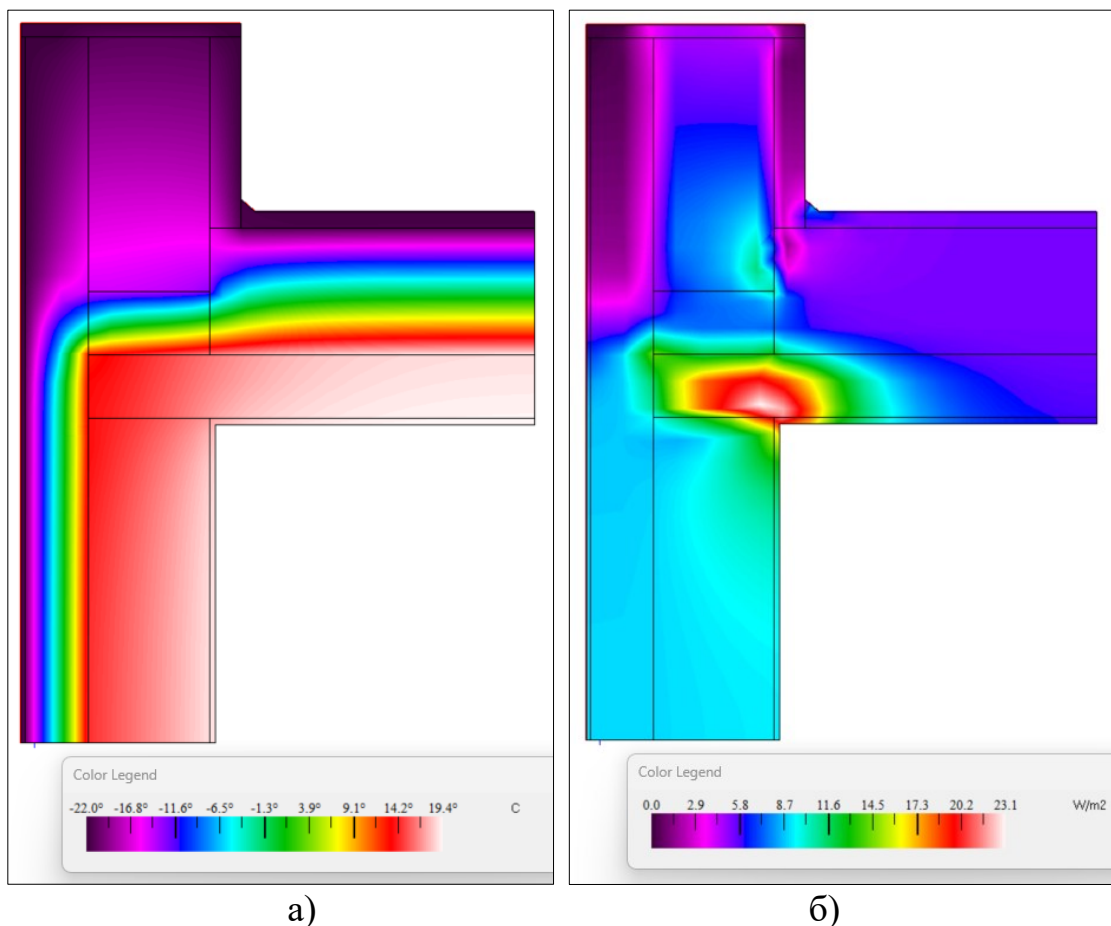
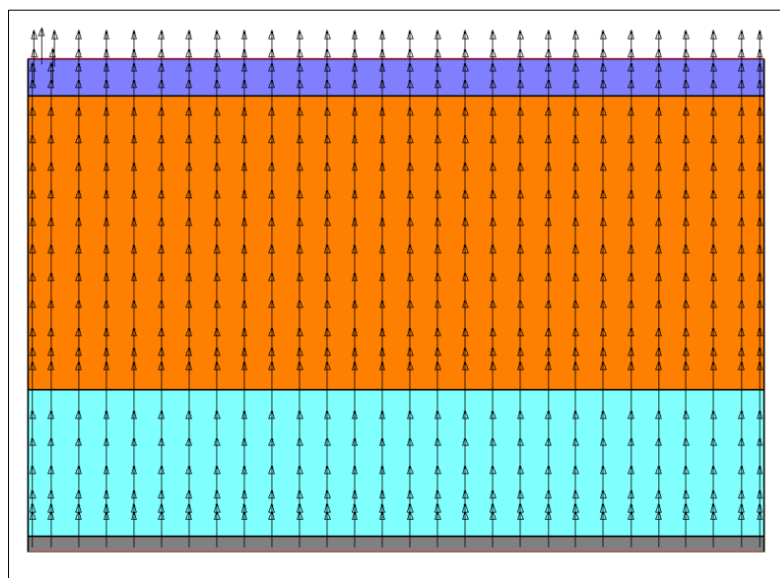


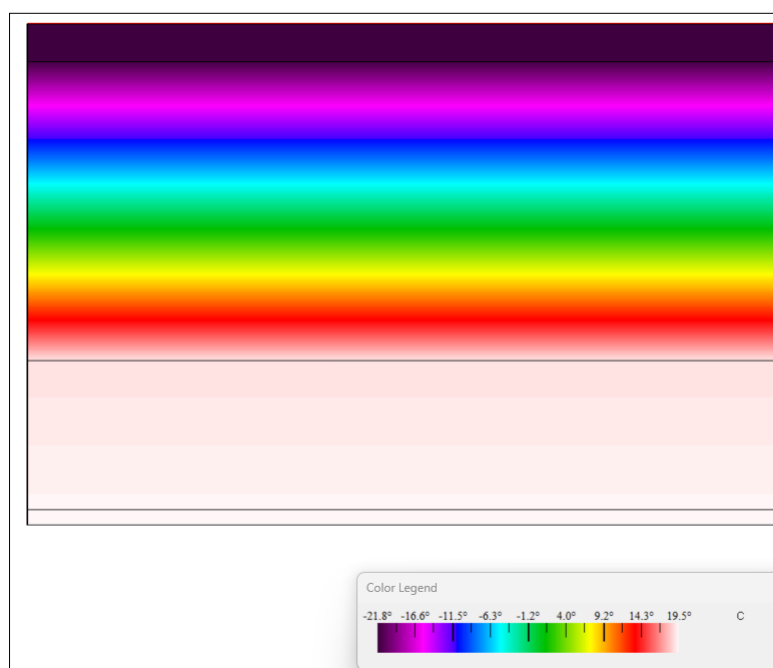
Рисунок 3.23 – Модель покращеного конструктивного вузла: а) інфрачервоне зображення розподілу температур; б) розподіл густини теплового потоку

У результаті удосконалення конструкції вузла примикання парапету до плити перекриття було досягнуто суттєвого покращення теплозахисних характеристик. Щільність теплового потоку зменшилась більш ніж утричі, максимальні значення не перевищують 23 Вт/м<sup>2</sup>. Температурне поле стало більш рівномірним, без зосереджених зон втрат й, відповідно, зменшення ризику переохолодження і потенційного конденсатоутворення.

На рисунку 3.24 зображено результати моделювання термічно однорідної ділянки огорожувальної конструкції – компонент А (дах).



а)



б)

Рисунок 3.24 – Модель однорідного елемента конструктивного вузла: а) розподіл векторів густини теплового потоку; б) інфрачервоне зображення розподілу температур

Інша термічно однорідна ділянка огорожувальної конструкції — компонент Б (стіна) — є ідентичною тій, що розглянута в п. 3.1.1.

Після побудови моделі вузла в середовищі THERM та аналізу розподілу температурних полів і теплових потоків, було проведено розрахунок лінійного

коефіцієнта теплопередачі. Результати моделювання та розрахунків зведено в таблицю 3.11.

Таблиця 3.11 – Результати моделювання покращеного вузла примикання плити перекриття плоского даху до стіни та парапету

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
2D модель	Внутрішні обміри	0,2399	42,0	2,00	20,15	6,37%
	Зовнішні обміри	0,1018	42,0	4,44	18,97	6,37%
Компонент А, однорідний						
Дах	Внутрішні обміри	0,1276	42,0	1,00	5,36	0,00%
	Зовнішні обміри	0,1276	42,0	1,00	5,36	0,00%
Компонент Б, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2146	42,0	1	9,01	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2146	42,0	1,00	9,01	0,00%
Результати розрахунку		$L^{2D}$ , (Вт/м·К)	$U \cdot l$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ -середнє, (Вт/м·К)	
Внутрішні обміри		0,4798	0,3422	0,138	<b>0,124</b>	
Зовнішні обміри		0,4516	0,3422	0,109		

Встановлено, що збільшення товщини ізоляції зовнішньої стіни та над перекриттям до 200 мм та 400 мм відповідно, в комплексі з використанням теплоізоляційного блоку між цегляною кладкою парапету та плитою перекриття, та додаткова теплова ізоляція внутрішньої сторони парапету зменшили лінійний коефіцієнт теплопередачі  $\psi$  на 72,3% з 0,463 до 0,124 Вт/(м·К).

### 3.1.4 Вузол примикання зовнішніх стін з цегли з опорядженням штукатуркою до балконного перекриття



На рисунку 3.25 наведено вузол примикання зовнішніх стін з цегли з опорядженням штукатуркою до балконного перекриття. В таблиці 3.12 наведено теплотехнічні властивості матеріалів з яких складається конструктивний вузол .

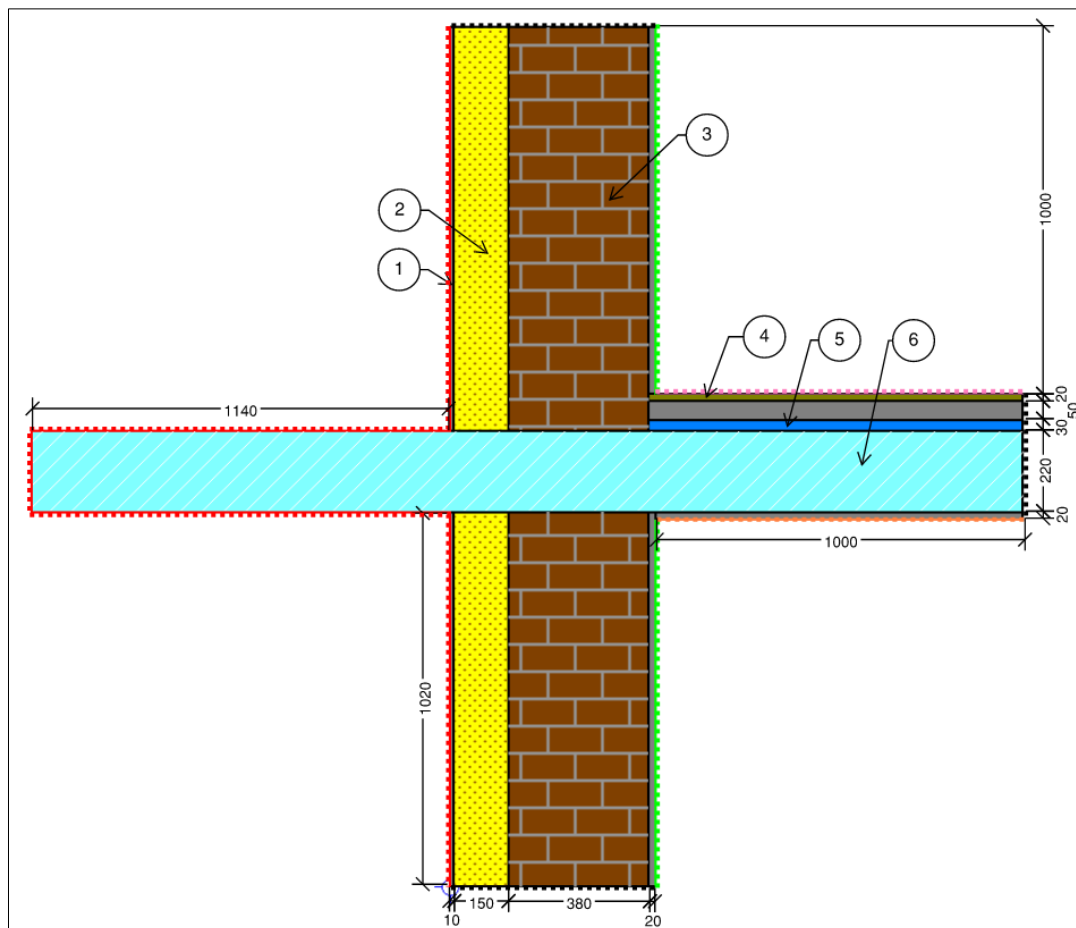


Рисунок 3.25 – Схема базового вузла примикання зовнішніх стін до балконного перекриття

Таблиця 3.12 – Властивості матеріалів вузла примикання зовнішніх стін до міжповерхового перекриття

Умовні позначки	Матеріал	$\lambda$ , Вт/м·К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	Розчин цементно-піщаний	0,93	1800
2	Утеплювач мінераловатний	0,050	150
3	Цегляна кладка (керамічна)	0,81	1800
4	Дерев'яне покриття підлоги (дуб, поперек волокон)	0,23	700
5	Екструдований пінополістирол	0,037	35
6	Залізобетон	2,04	2500

Наведений вище конструктивний вузол було змодельовано в програмному середовищі THERM. На рисунках 3.26 та 3.27 зображено результати моделювання.

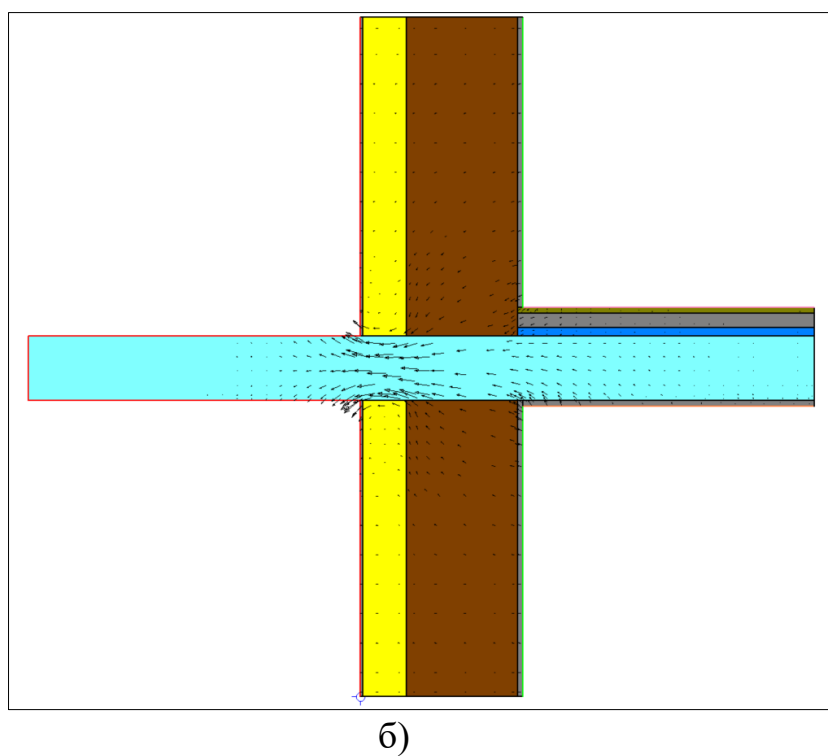
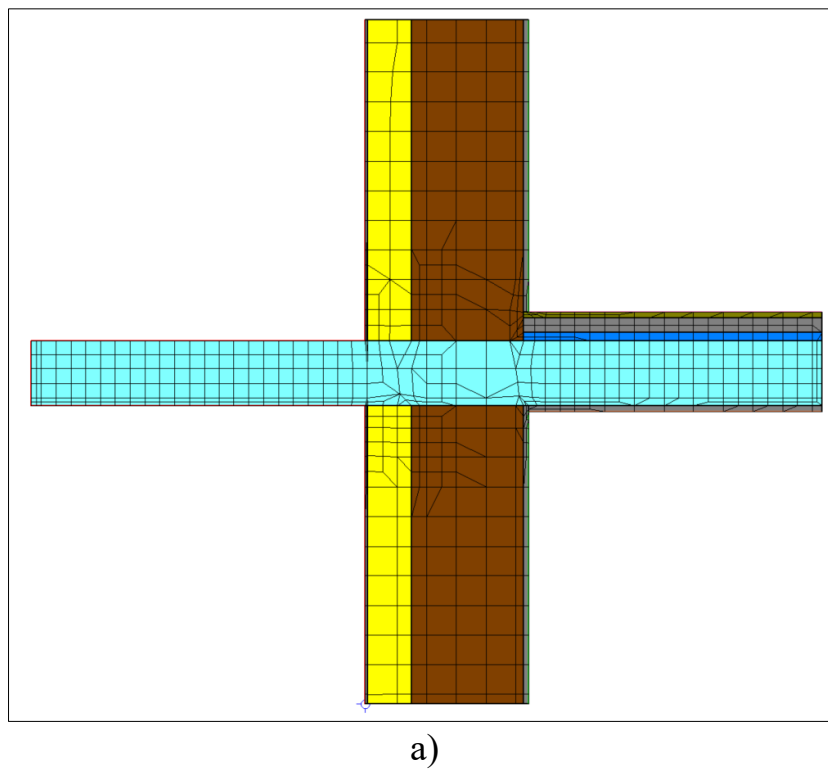


Рисунок 3.26 – Модель конструктивного вузла: а) застосована сітка FEM; б) розподіл векторів густини теплового потоку

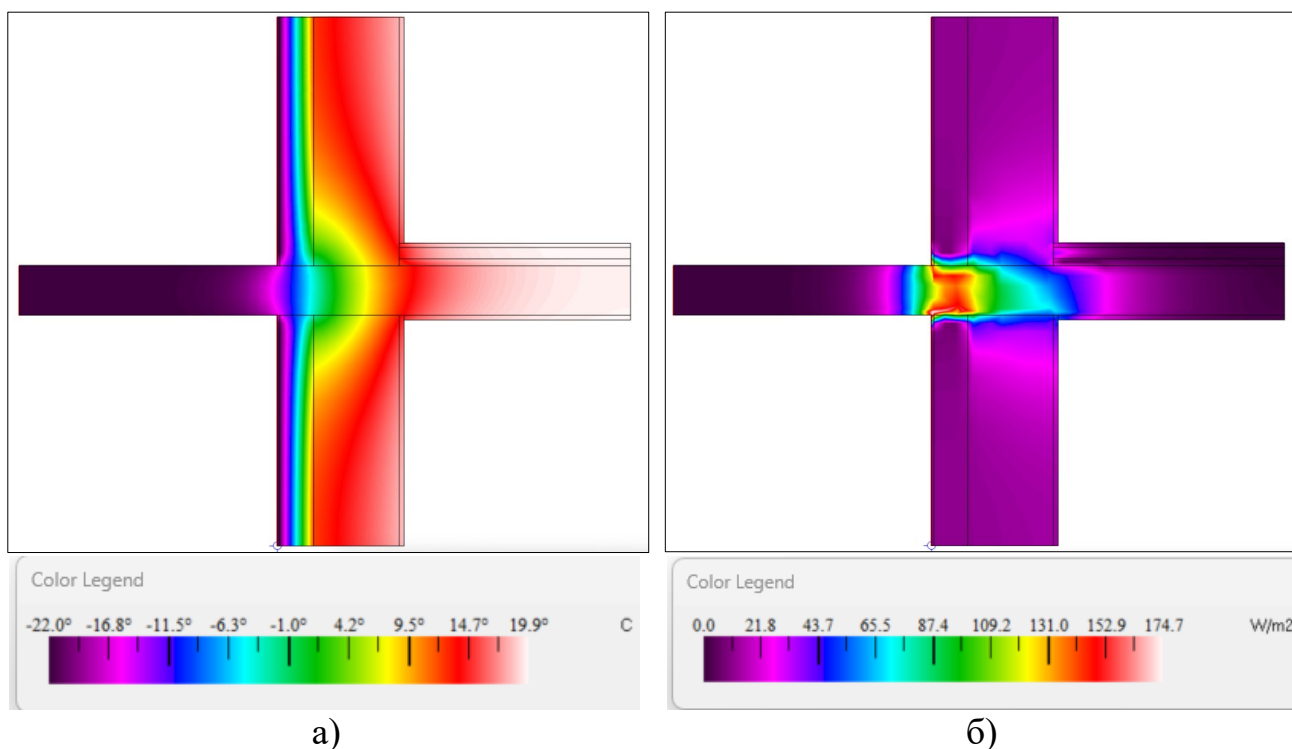


Рисунок 3.27 – Модель конструктивного вузла: а) інфрачервоне зображення розподілу температур; б) розподіл густини теплового потоку

Результати моделювання вузла примикання балконної плити до зовнішньої стіни показали наявність досить інтенсивного містка холоду, що проявляється через високі локальні теплові втрати (понад  $170 \text{ Вт/м}^2$ ) та різке зниження температур на внутрішній поверхні огороження.

Термічно однорідна ділянка огорожувальної конструкції — компонент А (стіна) — є ідентичною тій, що розглянута в п. 3.1.1.

Після побудови моделі вузла в середовищі THERM та аналізу розподілу температурних полів і теплових потоків, було проведено розрахунок лінійного коефіцієнта теплопередачі. Результати моделювання та розрахунків були зведені в таблицю 3.13.

Таблиця 3.13 – Результати моделювання базового вузла примикання зовнішніх стін з цегли з опорядженням штукатуркою до балконного перекриття

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
2D модель	Внутрішні обміри	0,3221	42,0	4,00	54,1 1	7.35%
	Зовнішні обміри	0,2789	42,0	4,62	54,1 2	7.35%
Компонент А, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2733	42,0	2,00	22,9 6	0.00%
	Зовнішні обміри	0,2733	42,0	2,00	22,9 6	0.00%
Результати розрахунку		$L^{2D}$ , (Вт/м·К)	$U \cdot l$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ -середнє, (Вт/м·К)	
Внутрішні обміри		1,2884	0,5466	0,742	<b>0,742</b>	
Зовнішні обміри		1,2885	0,5466	0,742		

У результаті чисельного моделювання вузла примикання балконної плити до зовнішньої стіни було отримано значення  $\psi = 0,742$  Вт/(м·К), що значно перевищує допустимі межі згідно з рекомендаціями для будівель nZEB. Це свідчить про значні додаткові тепловтрати, спричинені перериванням теплоізоляційного шару та відсутністю терморозриву в зоні проходження залізобетонної плити крізь оболонку будівлі. Для вдосконалення конструктивного вузла пропонується застосувати додаткову теплоізоляцію балконної плити товщиною 100 мм з трьох боків, і також збільшити товщину теплоізоляційного шару зовнішньої стіни до 200 мм. Покращений конструктивний вузол зображено на рисунку 3.27.

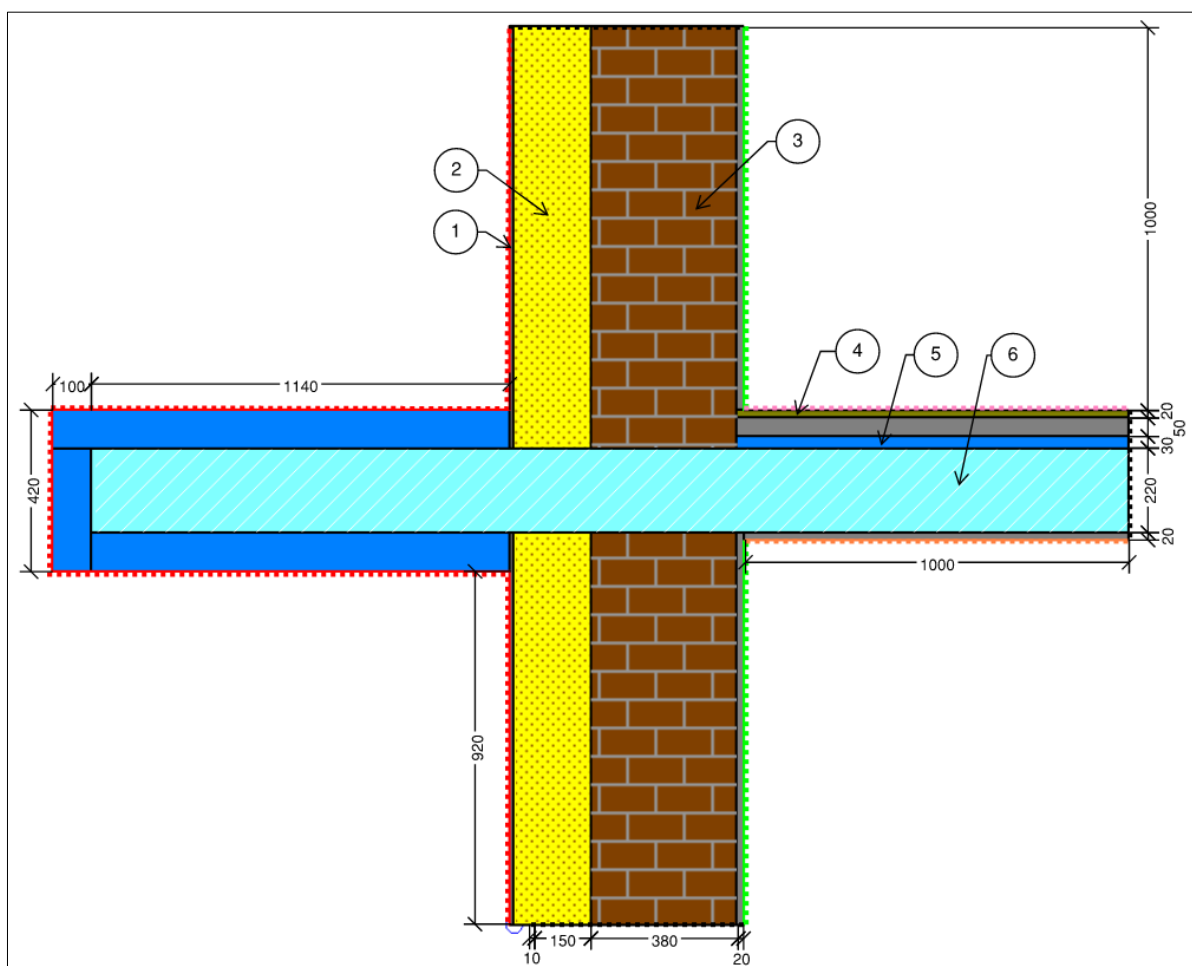


Рисунок 3.27 – Схема покращеного вузла примикання балконної плити до зовнішньої стіни

Теплотехнічні властивості матеріалів та параметри граничних умов не відрізняються від базової конструкції розглянутої раніше та вказані в таблицях 3.1 і 3.12. Результати моделювання в програмному середовищі THERM зображено на рисунках 3.28 та 3.29.

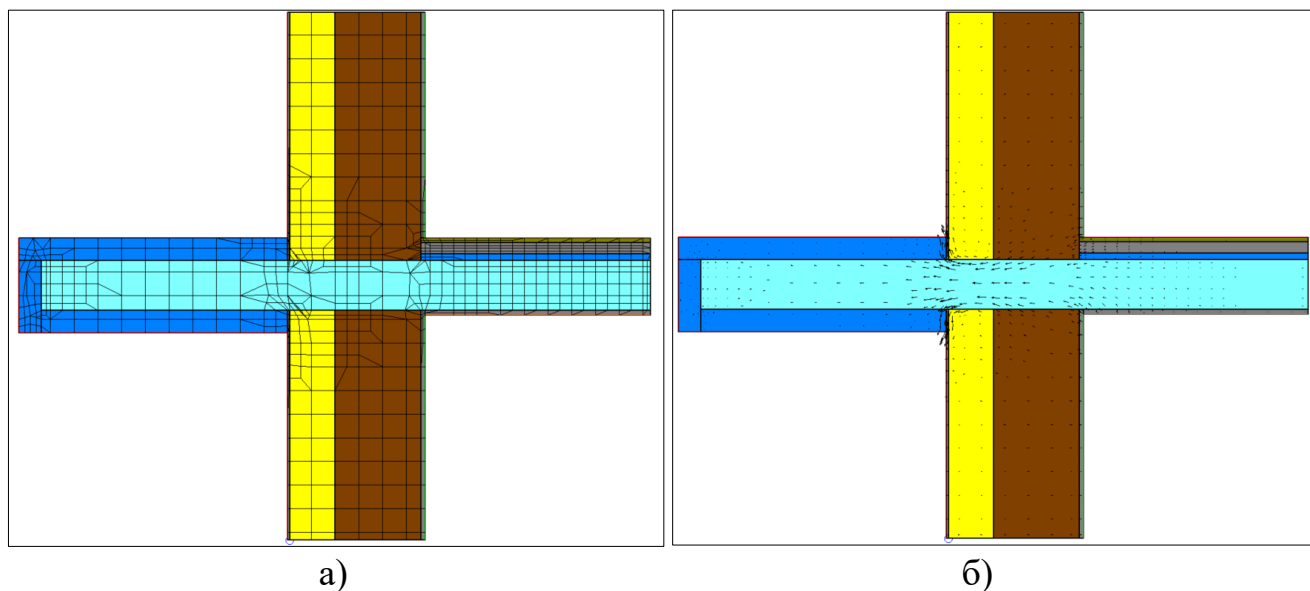


Рисунок 3.28 – Модель покращеного конструктивного вузла: а) застосована сітка FEM; б) розподіл векторів густини теплового потоку

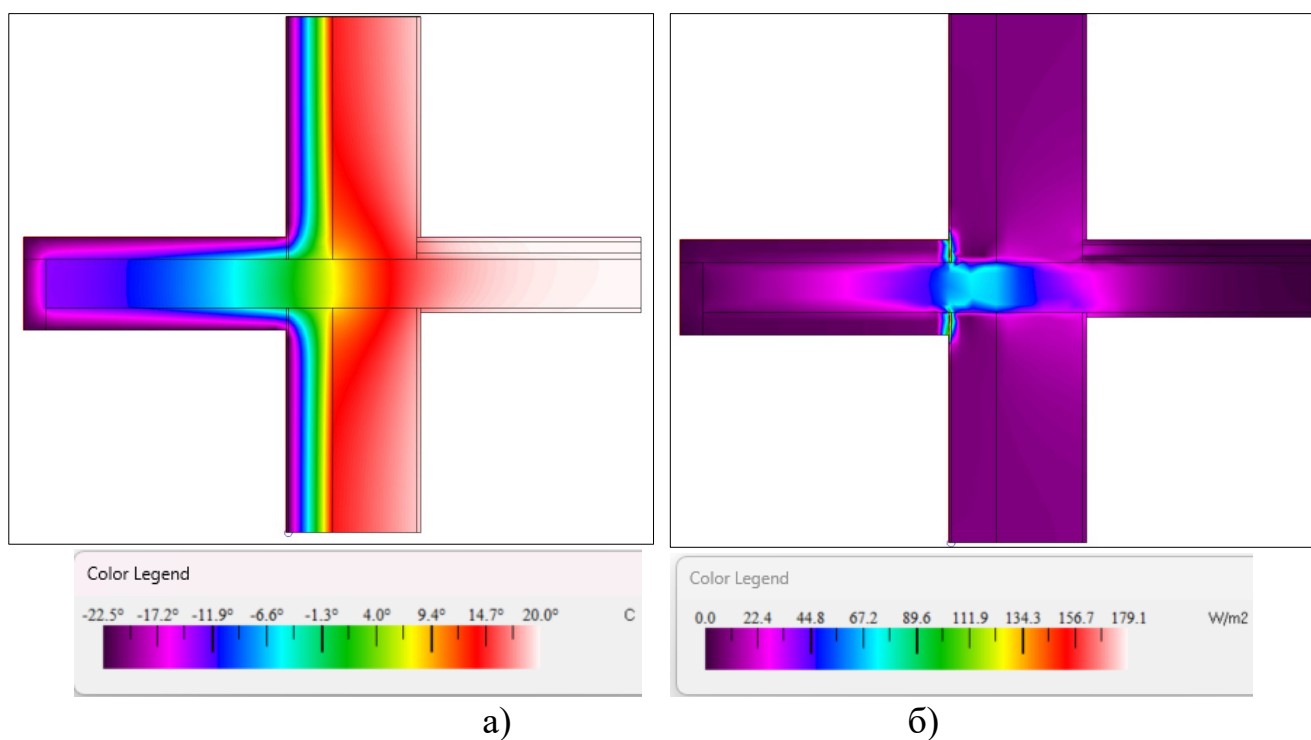


Рисунок 3.29 – Модель покращеного конструктивного вузла: а) інфрачервоне зображення розподілу температур; б) розподіл густини теплового потоку

Як видно з результатів моделювання, удосконалення конструкції вузла примикання плити балкону до зовнішньої стіни призвело до суттєвого зменшення щільності теплового потоку в критичних зонах — з понад 170 до менше 60 Вт/м<sup>2</sup>.

Термічно однорідна ділянка огорожувальної конструкції — компонент А (стіна) — є ідентичною тій, що розглянута в п. 3.1.1.

Результати розрахунку енергетичних показників покращеного конструктивного вузла зведені до таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 – Результати моделювання покращеного вузла примикання балконної плити до зовнішньої стіни

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
2D модель	Внутрішні обміри	0,2001	42,0	4,00	33,62	8,49%
	Зовнішні обміри	0,1696	42,0	4,72	33,62	8,49%
Компонент А, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2149	42,0	2,00	18,05	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2149	42,0	2,00	18,05	0,00%
Результати розрахунку		$L^{2D}$ , (Вт/м·К)	$U \cdot l$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ -середнє, (Вт/м·К)	
Внутрішні обміри		0,8004	0,4298	0,371	<b>0,371</b>	
Зовнішні обміри		0,8005	0,4298	0,371		

У результаті чисельного моделювання вдосконаленого вузла примикання плити балконного перекриття до зовнішньої стіни значення лінійного коефіцієнта теплопередачі  $\psi$  становить 0,371 Вт/(м·К). Порівняно з базовим варіантом вузла, де  $\psi$  становив 0,742 Вт/(м·К), це свідчить про зниження теплових втрат на 50 %. Отримане значення підтверджує ефективність обраних удосконалень. Подальше зниження  $\psi$ -фактора можливе за рахунок застосування терморозривів.

### 3.1.5 Вузол примикання віконної конструкції до зовнішніх стін

В даному дослідженні моделювались вузли примикання віконної конструкції у зоні перемички, підвіконня, а також рядового сполучення. Базова конструкція зовнішньої стіни утеплена мінеральною ватою товщиною 150 мм з монтажем вікна безпосередньо на цегляну кладку або залізобетонну перемичку. Покращені конструктивні вузли розглядались з більш товстим шаром теплоізоляції зовнішніх стін 200 мм та виносним монтажем вікна з теплоізоляційним профілем високої щільності [63]. Теплотехнічні властивості віконної конструкції в покращеному випадку не змінювались та залишались такими ж, як і в базовій конструкції.

Теплотехнічні параметри віконної конструкції були отримані шляхом налаштування моделі вікна у програмному продукті WINDOW, особливістю якого є здатність працювати у зв'язці з програмою THERM для чисельного аналізу рами та склопакету в 2D середовищі. Конструкція віконного блоку виконана на основі багатокамерного ПВХ-профілю з герметичними ущільненнями та двокамерним склопакетом заповненим сумішшю: повітря-10% та аргону-90% (рисунок 3.30).

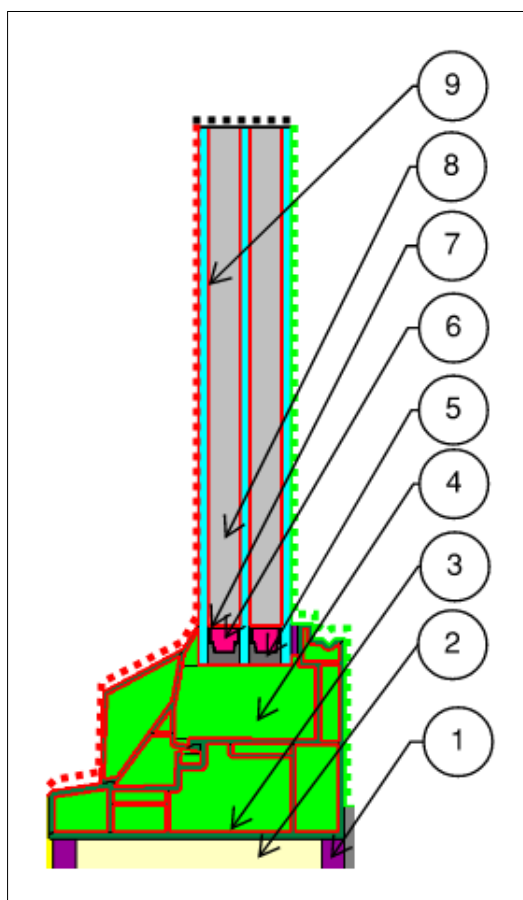


Рисунок 3.30 – Схема віконної конструкції



Теплотехнічні властивості матеріалів наведено в таблиці 3.15. Наведений вище конструктивний вузол було змодельовано в програмному середовищі THERM згідно методик EN ISO 10077 та ANSI/NFRC-100-2023 [64, 65, 66]. Результати моделювання зображено на рисунку 3.31.

Таблиця 3.15 – Властивості матеріалів віконної конструкції

Умовні позначки	Матеріал	$\lambda$ , Вт/м·К
1	Силікон	0,35
2	Поліуретанова піна	0,05
3	ПВХ/Вініл (твердий)	0,17
4	Повітряний прошарок (автоматична симуляція в THERM)	-
5	Бутиловий каучук	0,24
6	Осушувач (молекулярне сито)	0,10
7	Дистанційна рамка (алюмінієвий сплав)	160,0
8	Газова суміш (10% повітря, 90% аргон)	0,00986
9	Скло	1,0

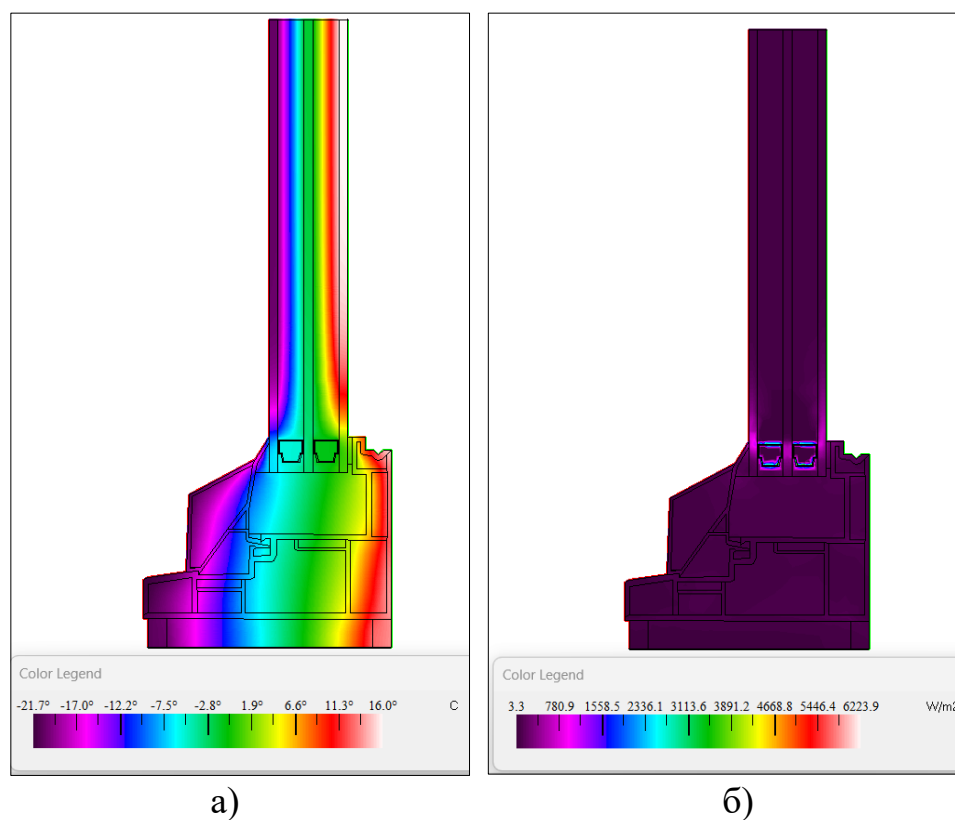


Рисунок 3.31 – Модель віконної конструкції: а) інфрачервоне зображення розподілу температур; б) розподіл густини теплового потоку

Результати розрахунку енергетичних показників віконної конструкції, які будуть використовуватись при подальшому аналізі контакту з елементами оболонки будівель зведені до таблиці 3.16.

Таблиця 3.16 – Результати моделювання віконної конструкції

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
Вікно (2D). Зона перемички	Внутрішні обміри	1,2846	42,0	0,242	13,07	7,26%
	Зовнішні обміри	1,2196	42,0	0,255	13,07	7,26%
Вікно (2D). Зона підвіконня	Внутрішні обміри	1,2853	42,0	0,243	13,07	7,77%
	Зовнішні обміри	1,2497	42,0	0,243	12,78	7,77%
Вікно (2D). Зона рядового сполучення	Внутрішні обміри	1,2660	42,0	0,242	12,88	7,84%
	Зовнішні обміри	1,2020	42,0	0,255	12,88	7,84%

За результатами моделювання встановлено, що найбільші втрати тепла спостерігаються в зоні дистанційної рамки склопакета. Значення щільності теплового потоку в цій області досягає 6223,9 Вт/м<sup>2</sup>. Такі втрати пояснюються високою теплопровідністю металевої рамки та відсутністю термічного розриву в її зоні. Ділянки ПВХ-профілю забезпечують прийнятні температурні показники, що підтверджує ефективність багатокамерної структури з низькою теплопровідністю.

### 3.1.5.1 Вузол примикання віконної конструкції до зовнішніх стін у зоні перемички

На рисунку 3.32 наведено вузол примикання віконної конструкції до зовнішніх стін у зоні перемички. В таблиці 3.17 наведено теплотехнічні властивості матеріалів з яких складається конструктивний вузол .

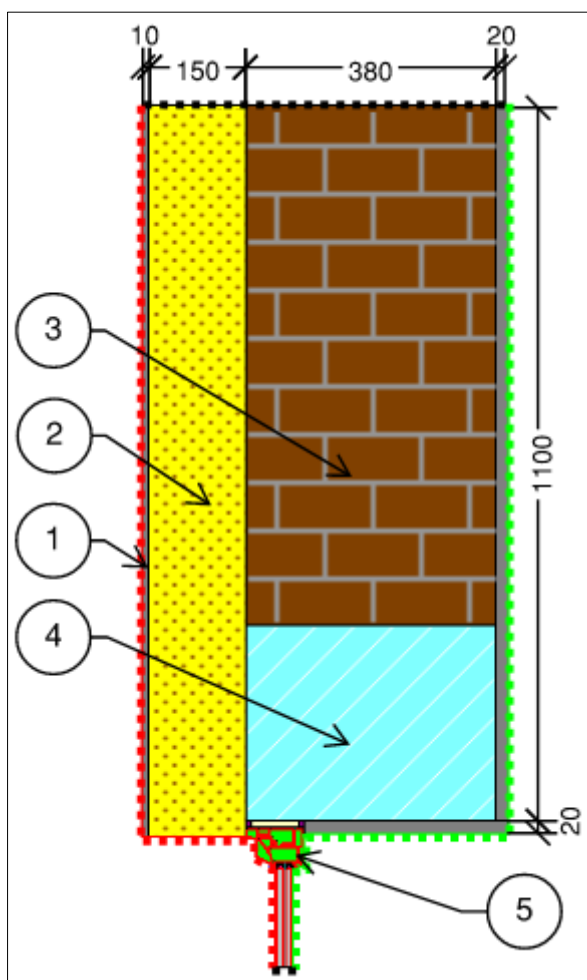


Рисунок 3.32 – Схема базового вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні перемички

Таблиця 3.17 – Властивості матеріалів вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні перемички

Умовні позначки	Матеріал	$\lambda$ , Вт/м·К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	Розчин цементно-піщаний	0,93	1800
2	Утеплювач мінераловатний	0,050	150
3	Цегляна кладка (керамічна)	0,81	1800
4	Залізобетон	2,04	2500
5	Віконна конструкція (див. розділ 3.1.5)		

Наведений вище конструктивний вузол було змодельовано в програмному середовищі THERM. Результати моделювання зображено на рисунках 3.33 та 3.34.

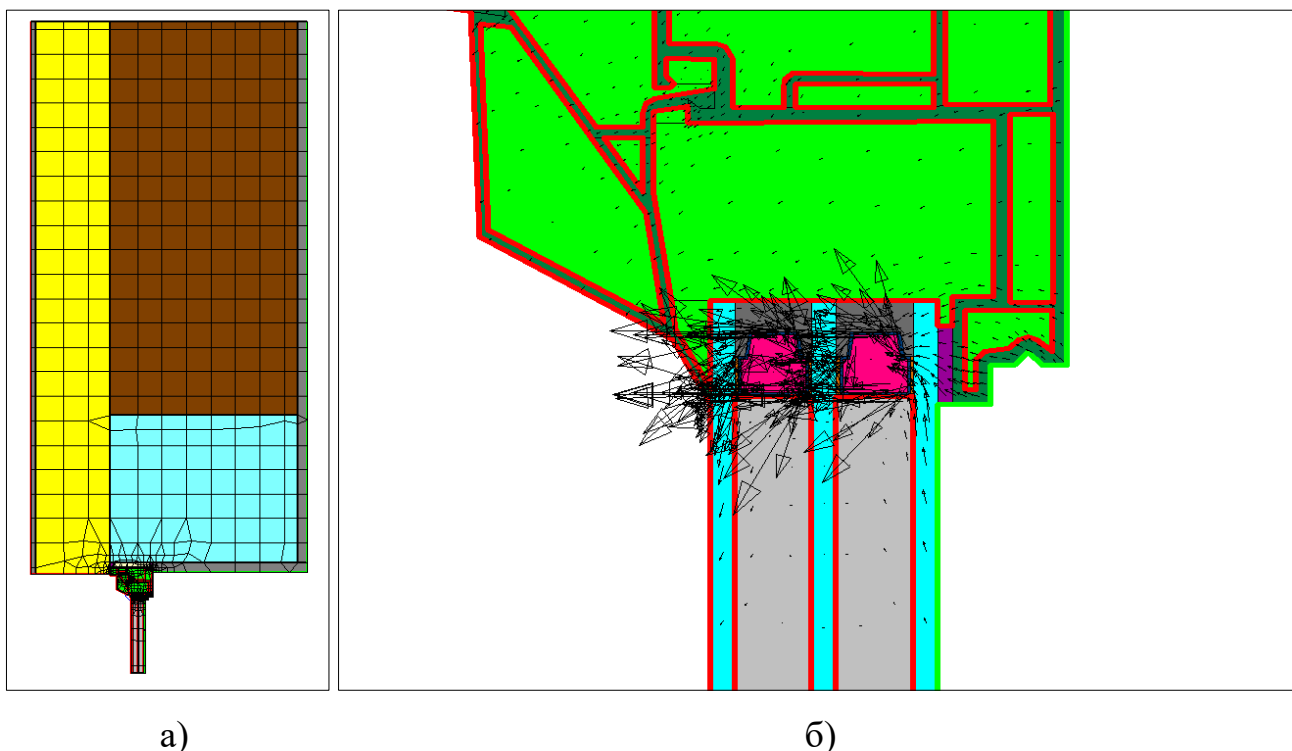


Рисунок 3.33 – Модель конструктивного вузла: а) застосована сітка FEM; б) розподіл векторів густини теплового потоку в найбільш чутливій ділянці вікна

Як видно, на зображенні представлено результат чисельного моделювання напрямку теплового потоку в зоні верхньої частини віконного профілю. Векторне поле чітко демонструє локалізацію інтенсивного теплопереносу в зоні дистанційної рамки, яка має високу теплопровідність. Найбільша концентрація теплових потоків відбувається по периметру склопакета — саме тут стрілки векторів щільно згущені й спрямовані від внутрішньої поверхні до зовнішньої, минаючи більш теплоізовані зони ПВХ-профілю. Подальша графічна демонстрація розподілу густини теплового потоку для всього конструктивного вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні перемички не є достатньо інформативною через наявність елемента конструкції з дуже високою теплопровідністю (дистанційна рамка).

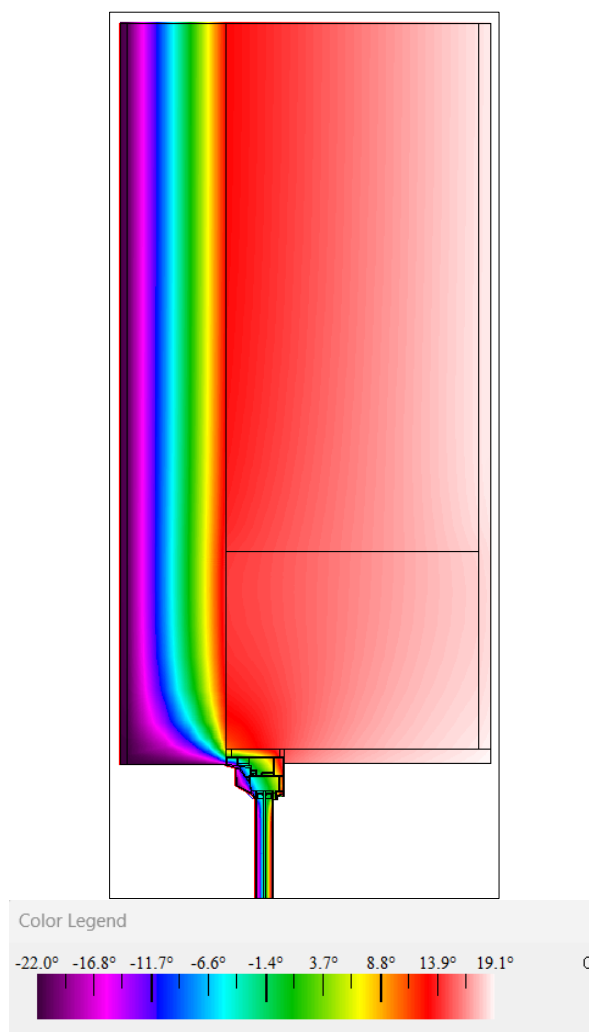


Рисунок 3.34 – Інфрачервоне зображення розподілу температур моделі конструктивного вузла

З результатів моделювання видно, що основна частина конструкції забезпечує задовільну термічну ефективність, проте найбільш деформовані ізотерми спостерігаються в зоні примикання віконної рами до стіни, особливо біля нижньої частини. Тобто зона стику вікна зі стіною потребує додаткової оптимізації.

Термічно однорідна ділянка огорожувальної конструкції — компонент А (стіна) — є ідентичною тій, що розглянута в п. 3.1.1. Інша частина конструктивного вузла – вікно, при визначенні лінійного коефіцієнта теплопередачі виступатиме як компонент Б (таблиця 3.16).

Після побудови моделі вузла в середовищі THERM було проаналізовано розподіл температурних полів і теплових потоків. Результати розрахунку лінійного коефіцієнта теплопередачі зведені в таблицю 3.18.

Таблиця 3.18 – Результати моделювання базового вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні перемички

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
2D модель	Внутрішні обміри	0,4391	42,0	1,65	30,52	8,87%
	Зовнішні обміри	0,4806	42,0	1,51	30,52	8,87%
Компонент А, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2732	42,0	1,10	12,62	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2732	42,0	1,10	12,62	0,00%
Компонент Б						
Вікно	Внутрішні обміри	1,2846	42,0	0,242	13,07	7,26%
	Зовнішні обміри	1,2196	42,0	0,255	13,07	7,26%
Результати розрахунку		$L^{2D}$ , (Вт/м·К)	$U \cdot l$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ -середнє, (Вт/м·К)	
Внутрішні обміри		0,7267	0,6116	0,115	<b>0,115</b>	
Зовнішні обміри		0,7266	0,6116	0,115		

На основі чисельного моделювання температурного поля у вузлі примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні перемички було визначено значення лінійного коефіцієнта теплопередачі  $\psi = 0,115$  Вт/(м·К). Отримана величина значно перевищує максимальне значення лінійних коефіцієнтів теплопередачі теплопровідних включень nZEB будівель.

Для покращення показника  $\psi$  доцільно застосувати збільшену зовнішню теплоізоляцію стіни в комбінації з виносним монтажем вікна з теплоізоляційним профілем (рисунок 3.35).

Запропоновано збільшення товщини ізоляції зовнішньої стіни до 200 мм, а кріплення вікна зробити методом виносного монтажу на теплоізоляційний профіль

високої щільності. Теплотехнічні властивості матеріалів вказано в таблиці 3.19. Результати моделювання наведено на рисунках 3.36.

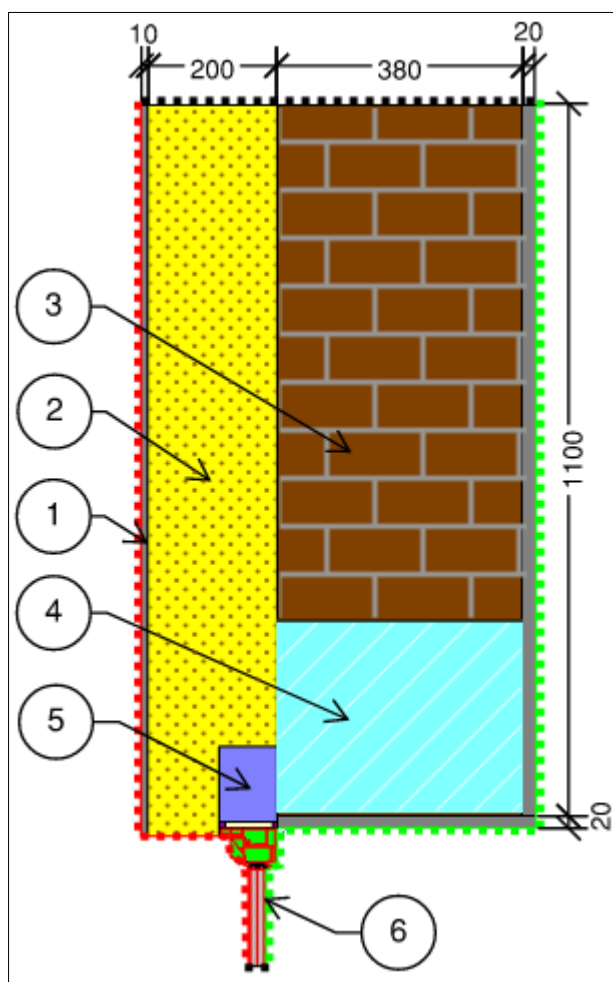


Рисунок 3.35 – Схема покращеного вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні перемички

Таблиця 3.19 – Властивості матеріалів вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні перемички

Умовні позначки	Матеріал	$\lambda$ , Вт/м·К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	Розчин цементно-піщаний	0,93	1800
2	Утеплювач мінераловатний	0,050	150
3	Цегляна кладка (керамічна)	0,81	1800
4	Залізобетон	2,04	2500
5	Профіль blaugelb® Triotherm+ [63]	0,040	200
6	Віконна конструкція (див. розділ 3.1.5)		

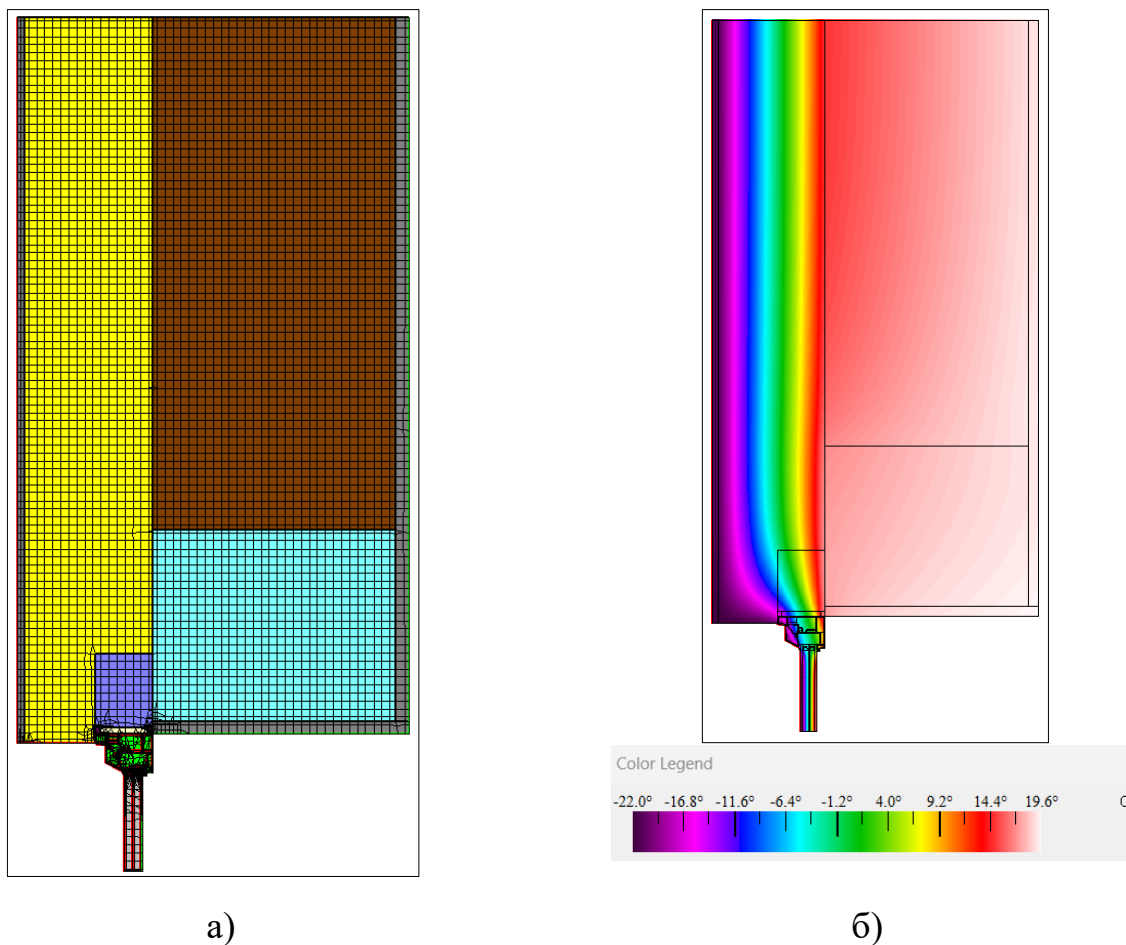


Рисунок 3.36 – Модель конструктивного вузла: а) застосована сітка FEM; б) інфрачервоне зображення розподілу температур

У результаті конструктивного удосконалення вузла віконний блок розміщується в площині теплоізоляції стіни, що дозволяє мінімізувати вплив теплопровідного включення при примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні перемички.

Термічно однорідна ділянка огорожувальної конструкції — компонент А (стіна) — є ідентичною тій, що розглянута в п. 3.1.1. Інша частина конструктивного вузла – вікно, при визначенні лінійного коефіцієнта теплопередачі виступатиме як компонент Б (таблиця 3.16). Результати розрахунку лінійного коефіцієнта теплопередачі зведені в таблицю 3.20.



Таблиця 3.20 – Результати моделювання покращеного вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні перемички

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
2D модель	Внутрішні обміри	0,3207	42,0	1,75	23,60	5,79%
	Зовнішні обміри	0,3785	42,0	1,48	23,60	5,79%
Компонент А, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2146	42,0	1,10	9,91	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2146	42,0	1,10	9,91	0,00%
Компонент Б						
Вікно	Внутрішні обміри	1,2846	42,0	0,242	13,07	7,26%
	Зовнішні обміри	1,2196	42,0	0,255	13,07	7,26%
Результати розрахунку		$L^{2D}$ , (Вт/м·К)	$U \cdot l$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ -середнє, (Вт/м·К)	
Внутрішні обміри		0.5619	0.5472	0.015	<b>0,015</b>	
Зовнішні обміри		0.5619	0.5472	0.015		

У результаті чисельного аналізу було встановлено, що запропоноване покращення посприяло значному зменшенню лінійного коефіцієнта теплопередачі до рівня 0,015 Вт/(м·К). Отриманий результат підтверджує, що виносне розміщення рами у площину теплоізоляції дозволяє значно зменшити лінійний коефіцієнт теплопередачі  $\psi$  і забезпечує надійний температурний режим на внутрішній поверхні огорожувальних конструкцій. Це є доцільним підходом для будівель, що проєктуються відповідно до сучасних стандартів майже нульового енергоспоживання (nZEB).

### 3.1.5.2 Вузол примикання віконної конструкції до зовнішніх стін у зоні підвіконня

На рисунку 3.37 наведено вузол примикання віконної конструкції до зовнішніх стін у зоні підвіконня. В таблиці 3.21 наведено теплотехнічні властивості матеріалів з яких складається конструктивний вузол .

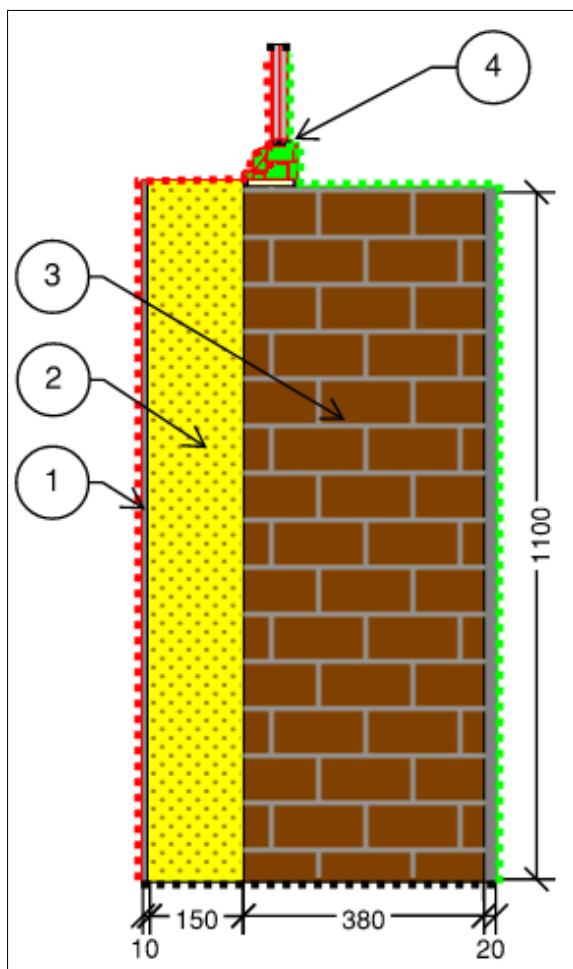


Рисунок 3.37 – Схема базового вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні підвіконня

Таблиця 3.21 – Властивості матеріалів вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні підвіконня

Умовні позначки	Матеріал	$\lambda$ , Вт/м·К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	Розчин цементно-піщаний	0,93	1800
2	Утеплювач мінераловатний	0,050	150
3	Цегляна кладка (керамічна)	0,81	1800
4	Віконна конструкція (див. розділ 3.1.5)		

Наведений вище конструктивний вузол було змодельовано в програмному середовищі THERM. Результати моделювання зображено на рисунку 3.38.

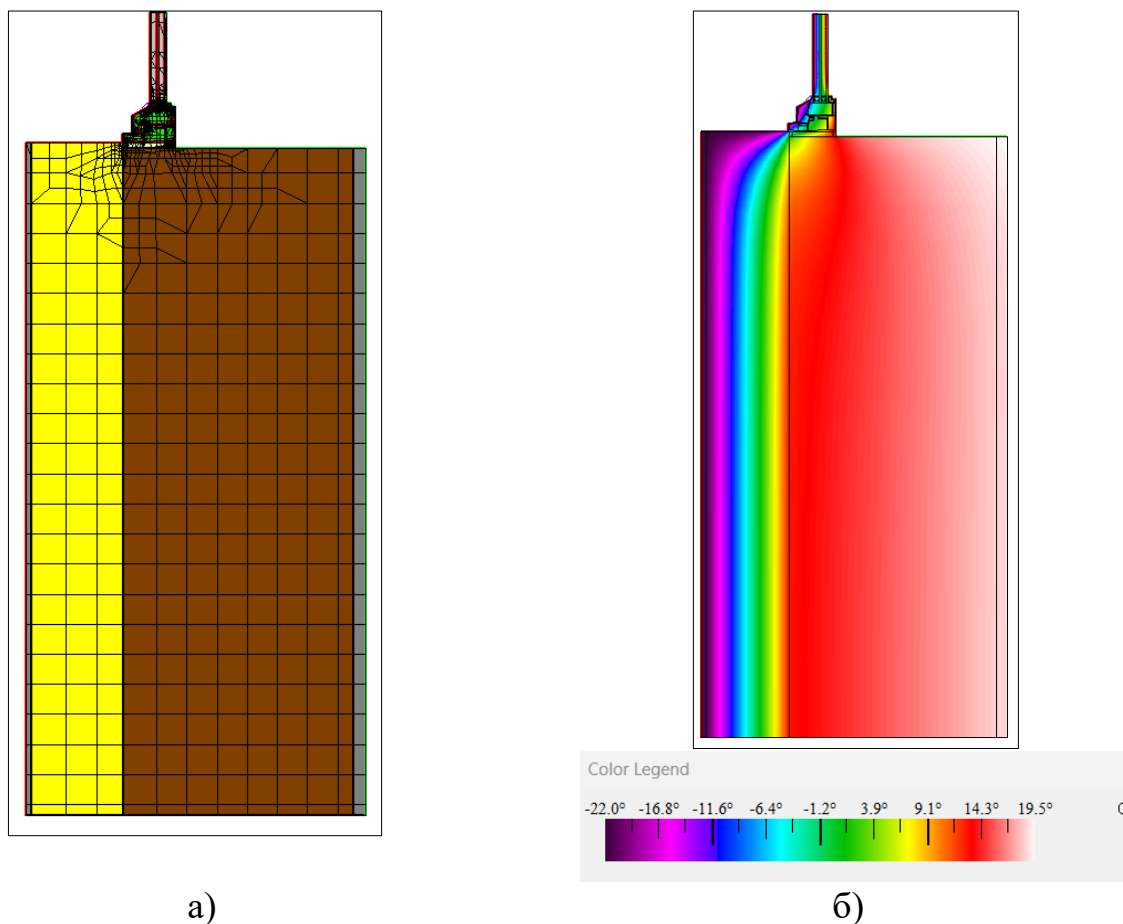


Рисунок 3.38 – Модель конструктивного вузла: а) застосована сітка FEM; б) інфрачервоне зображення розподілу температур

На зображенні представлено результат чисельного моделювання температурного розподілу в зоні примикання віконного блоку до зовнішньої стіни в області підвіконня. Аналіз температурного поля свідчить про наявність локального викривлення ізотерм поблизу монтажного шва, що вказує на формування теплопровідного включення.

Термічно однорідна ділянка огорожувальної конструкції — компонент А (стіна) — є ідентичною тій, що розглянута в п. 3.1.1. Інша частина конструктивного вузла – вікно, при визначенні лінійного коефіцієнта теплопередачі виступатиме як компонент Б (таблиця 3.16).

Після побудови моделі вузла в середовищі THERM було проаналізовано розподіл температурних полів і теплових потоків. Результати розрахунку лінійного коефіцієнта теплопередачі зведені в таблицю 3.22.

Таблиця 3.22 – Результати моделювання базового вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні підвіконня

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
2D модель	Внутрішні обміри	0,4366	42,0	1,65	30,34	5,47%
	Зовнішні обміри	0,4778	42,0	1,51	30,34	5,47%
Компонент А, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2732	42,0	1,10	12,62	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2732	42,0	1,10	12,62	0,00%
Компонент Б						
Вікно	Внутрішні обміри	1,2853	42,0	0,243	13,07	7,77%
	Зовнішні обміри	1,2497	42,0	0,243	12,78	7,77%
Результати розрахунку		$L^{2D}$ , (Вт/м·К)	$U \cdot l$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ -середнє, (Вт/м·К)	
Внутрішні обміри		0,7225	0,6117	0,111	<b>0,114</b>	
Зовнішні обміри		0,7224	0,6048	0,118		

На основі чисельного моделювання температурного поля у вузлі примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні перемички було визначено значення лінійного коефіцієнта теплопередачі  $\psi = 0,114$  Вт/(м·К). Отримана величина значно перевищує максимальне значення лінійних коефіцієнтів теплопередачі теплопровідних включень nZEB будівель.

Для покращення показника  $\psi$  доцільно застосувати збільшену зовнішню теплоізоляцію стіни в комбінації з виносним монтажем вікна з теплоізоляційним профілем (рисунок 3.39).

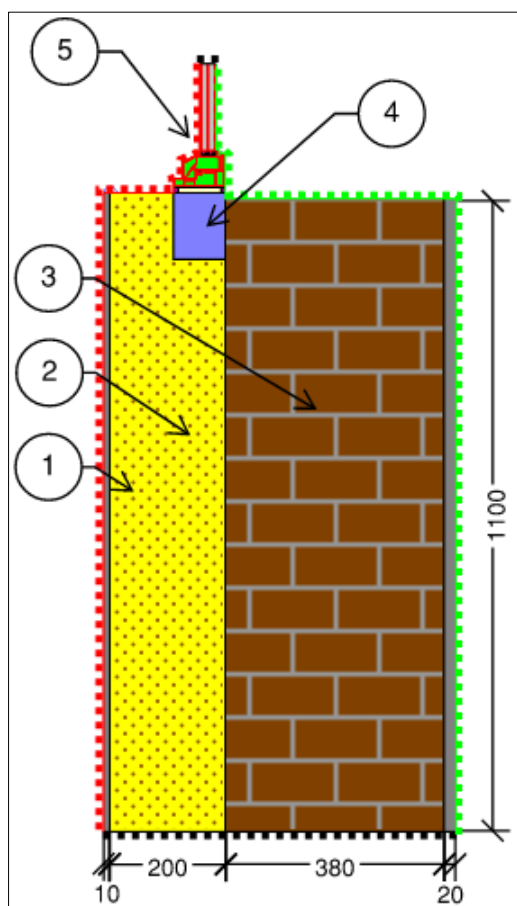


Рисунок 3.39 – Схема покращеного вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні підвіконня

Запропоновано збільшення товщини ізоляції зовнішньої стіни до 200 мм, а також кріплення вікна методом виносного монтажу на теплоізоляційний профіль високої щільності. Теплотехнічні властивості матеріалів вказано в таблиці 3.23. Результати моделювання наведено на рисунку 3.40 .

Таблиця 3.23 – Властивості матеріалів вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні підвіконня

Умовні позначки	Матеріал	$\lambda$ , Вт/м·К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	Розчин цементно-піщаний	0,93	1800
2	Утеплювач мінераловатний	0,050	150
3	Цегляна кладка (керамічна)	0,81	1800
4	Профіль blaugelb® Triotherm+ [63]	0,040	200
5	Віконна конструкція (див. розділ 3.1.5)		

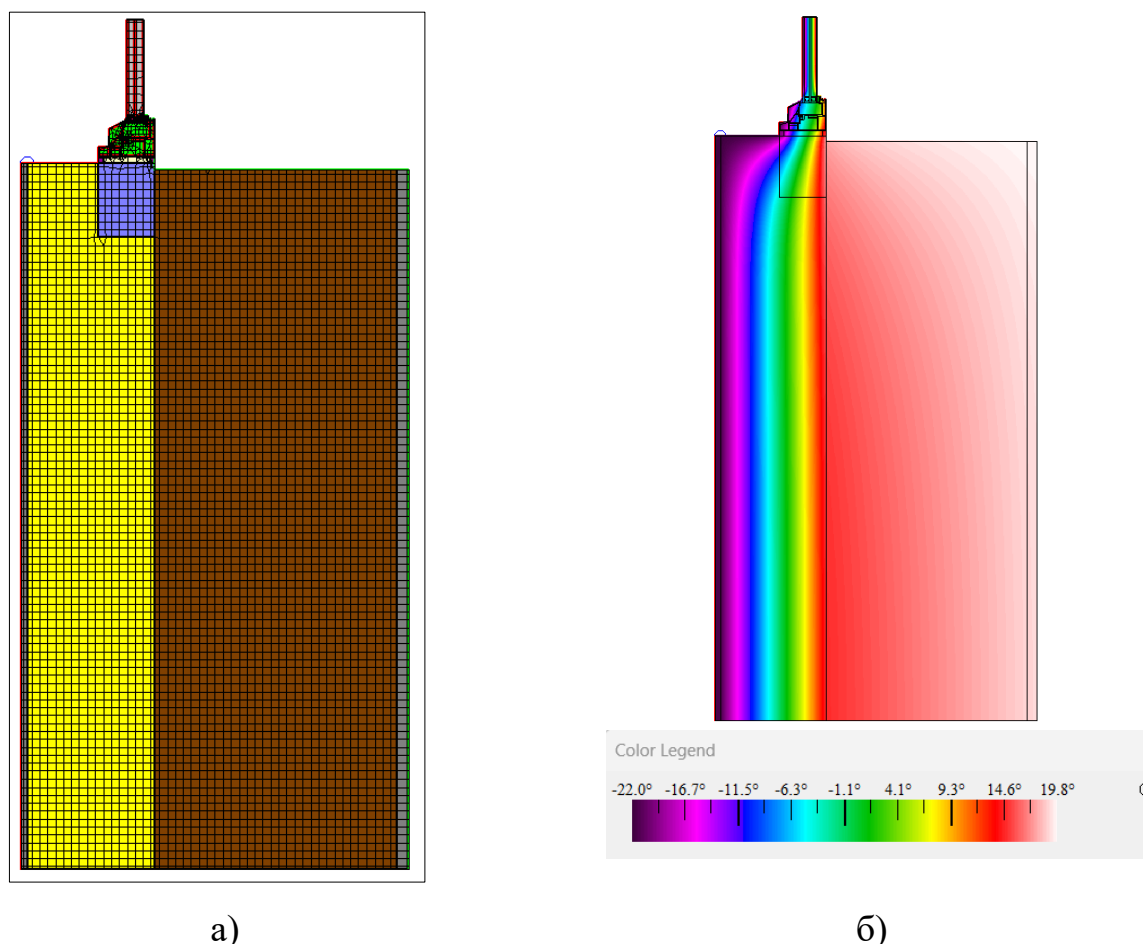


Рисунок 3.40 – Модель конструктивного вузла: а) застосована сітка FEM; б) інфрачервоне зображення розподілу температур

Аналогічно до випадку примикання в зоні перемички, віконний блок розміщується в площині теплоізоляції стіни, мінімізуючи вплив теплопровідного включення примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні підвіконня.

Термічно однорідна ділянка огорожувальної конструкції — компонент А (стіна) — є ідентичною тій, що розглянута в п. 3.1.1. Інша частина конструктивного вузла – вікно, при визначенні лінійного коефіцієнта теплопередачі виступатиме як компонент Б (таблиця 3.16).

Результати розрахунку лінійного коефіцієнта теплопередачі зведені в таблицю 3.24.

Таблиця 3.24 – Результати моделювання покращеного вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні підвіконня

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
2D модель	Внутрішні обміри	0,3677	42,0	1,55	23,90	9,81%
	Зовнішні обміри	0,3833	42,0	1,48	23,90	9,81%
Компонент А, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2146	42,0	1,10	9,91	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2146	42,0	1,10	9,91	0,00%
Компонент Б						
Вікно	Внутрішні обміри	1,2853	42,0	0,243	13,07	7,77%
	Зовнішні обміри	1,2497	42,0	0,243	12,78	7,77%
Результати розрахунку		$L^{2D}$ , (Вт/м·К)	$U \cdot l$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ -середнє, (Вт/м·К)	
Внутрішні обміри		0,5691	0,5472	0,022	<b>0,025</b>	
Зовнішні обміри		0,5691	0,5403	0,029		

У результаті чисельного аналізу було встановлено, що запропоноване покращення посприяло значному зменшенню лінійного коефіцієнта теплопередачі до рівня 0,025 Вт/(м·К). Отриманий результат підтверджує, що виносне розміщення рами у площину теплоізоляції є доцільним підходом для будівель, що проєктуються відповідно до сучасних стандартів майже нульового енергоспоживання (nZEB).

### 3.1.5.3 Вузол примикання віконної конструкції до зовнішніх стін у зоні рядового сполучення

На рисунку 3.41 наведено вузол примикання віконної конструкції до зовнішніх стін у зоні рядового сполучення. В таблиці 3.25 наведено теплотехнічні властивості матеріалів з яких складається конструктивний вузол .

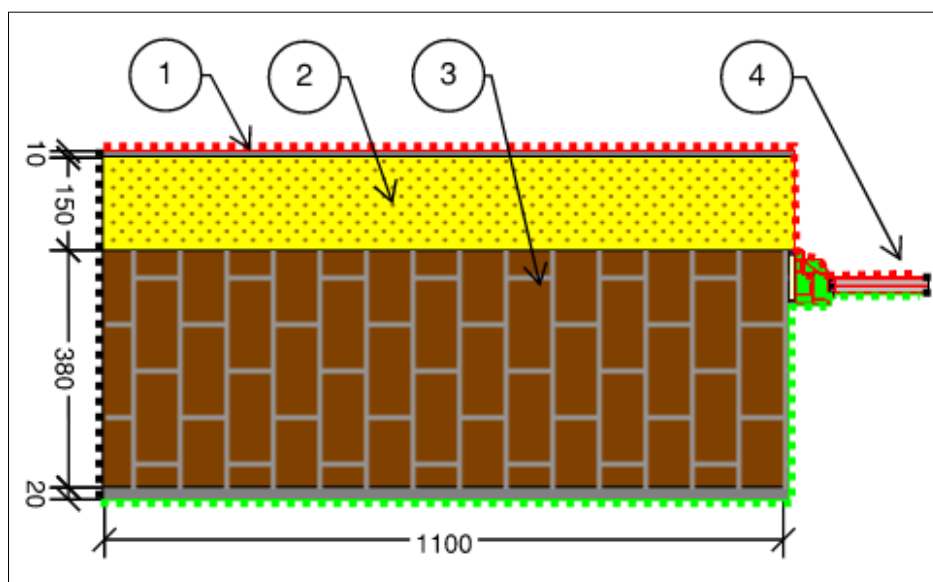


Рисунок 3.41 – Схема базового вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні рядового сполучення

Таблиця 3.25 – Властивості матеріалів вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні рядового сполучення

Умовні позначки	Матеріал	$\lambda$ , Вт/м·К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	Розчин цементно-піщаний	0,93	1800
2	Утеплювач мінераловатний	0,050	150
3	Цегляна кладка (керамічна)	0,81	1800
4	Віконна конструкція (див. розділ 3.1.5)		

Наведений вище конструктивний вузол було змодельовано в програмному середовищі THERM. Результати моделювання зображено на рисунку 3.42.



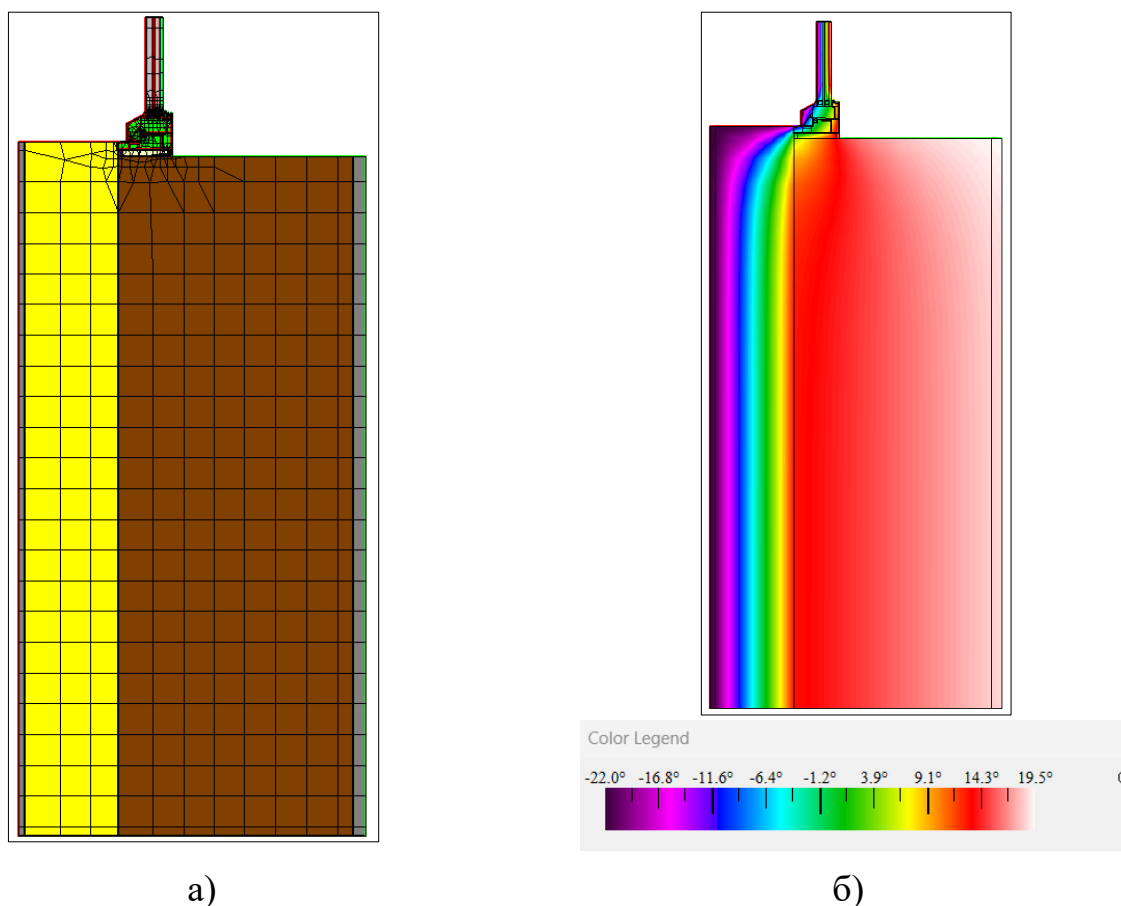


Рисунок 3.42 – Модель конструктивного вузла: а) застосована сітка FEM; б) інфрачервоне зображення розподілу температур

На зображенні представлено результат чисельного моделювання температурного розподілу в зоні примикання віконного блоку до зовнішньої стіни в області рядового сполучення. Аналіз температурного поля свідчить про наявність локального викривлення ізотерм поблизу монтажного шва, що вказує на формування теплопровідного включення.

Термічно однорідна ділянка огорожувальної конструкції — компонент А (стіна) — є ідентичною тій, що розглянута в п. 3.1.1. Інша частина конструктивного вузла – вікно, при визначенні лінійного коефіцієнта теплопередачі виступатиме як компонент Б (таблиця 3.16).

Після побудови моделі вузла в середовищі THERM було проаналізовано розподіл температурних полів і теплових потоків. Результати розрахунку лінійного коефіцієнта теплопередачі зведені в таблицю 3.26.

Таблиця 3.26 – Результати моделювання базового вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні рядового сполучення

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
2D модель	Внутрішні обміри	0,4203	42,0	1,65	29,21	9,28%
	Зовнішні обміри	0,4600	42,0	1,51	29,21	9,28%
Компонент А, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2732	42,0	1,10	12,62	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2732	42,0	1,10	12,62	0,00%
Компонент Б						
Вікно	Внутрішні обміри	1,2660	42,0	0,242	12,88	7,84%
	Зовнішні обміри	1,2020	42,0	0,255	12,88	7,84%
Результати розрахунку		$L^{2D}$ , (Вт/м·К)	$U \cdot l$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ -середнє, (Вт/м·К)	
Внутрішні обміри		0,6955	0,6070	0,089	<b>0,095</b>	
Зовнішні обміри		0,6955	0,5932	0,102		

На основі чисельного моделювання температурного поля у вузлі примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні перемички було визначено значення лінійного коефіцієнта теплопередачі  $\psi = 0,095$  Вт/(м·К). Отримана величина значно перевищує максимальне значення лінійних коефіцієнтів теплопередачі теплопровідних включень nZEB будівель.

Для покращення показника  $\psi$  доцільно застосувати збільшену зовнішню теплоізоляцію стіни в комбінації з виносним монтажем вікна з теплоізоляційним профілем (рисунок 3.43).

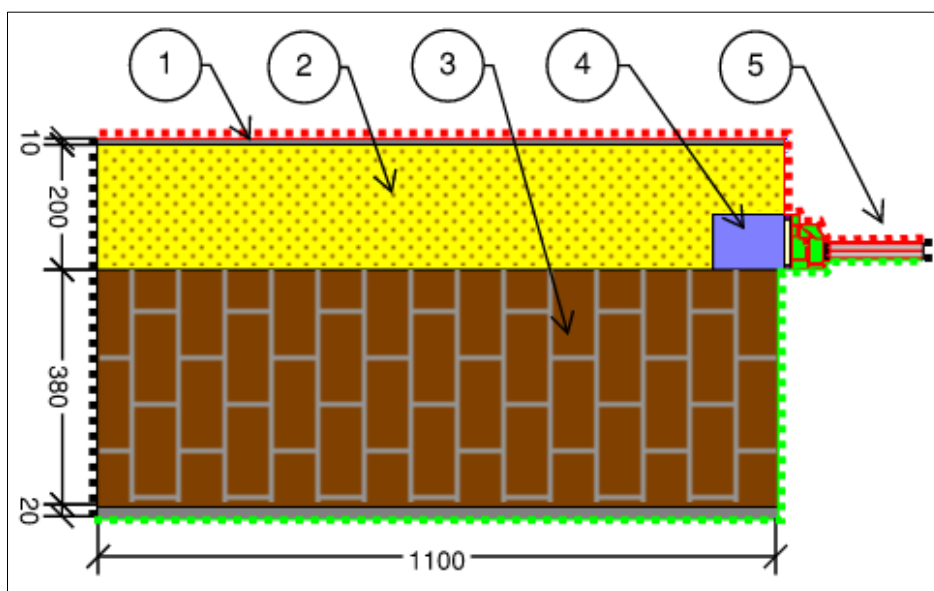


Рисунок 3.43 – Схема покращеного вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні рядового сполучення

Запропоновано збільшення товщини ізоляції зовнішньої стіни до 200 мм, кріплення вікна методом виносного монтажу на теплоізоляційний профіль високої щільності. Теплотехнічні властивості матеріалів вказано в таблиці 3.27. Результати моделювання наведено на рисунку 3.44 .

Таблиця 3.27 – Властивості матеріалів вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні рядового сполучення

Умовні позначки	Матеріал	$\lambda$ , Вт/м·К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	Розчин цементно-піщаний	0,93	1800
2	Утеплювач мінераловатний	0,050	150
3	Цегляна кладка (керамічна)	0,81	1800
4	Профіль blaugelb® Triotherm+ [63]	0,040	200
5	Віконна конструкція (див. розділ 3.1.5)		

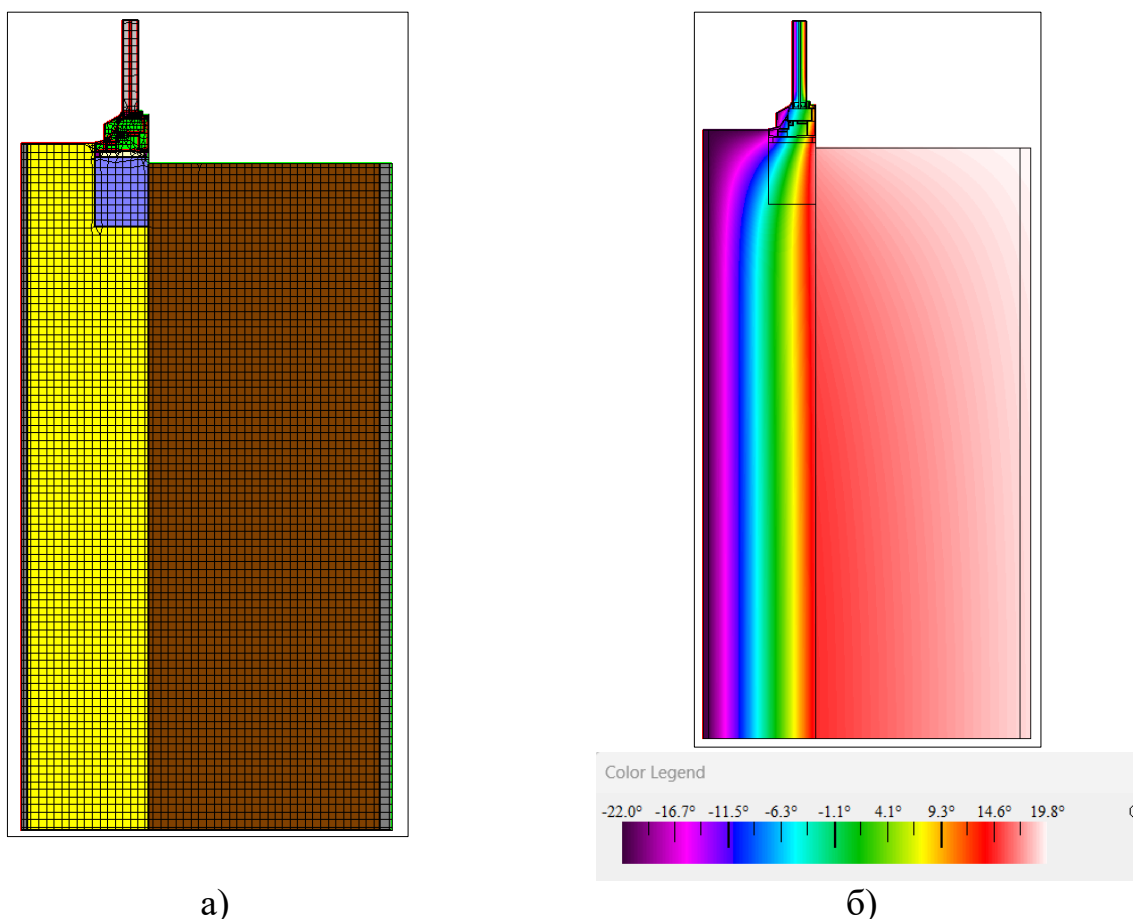


Рисунок 3.44 – Модель конструктивного вузла: а) застосована сітка FEM; б) інфрачервоне зображення розподілу температур

У результаті конструктивного удосконалення вузла віконний блок розміщується в площині теплоізоляції стіни, мінімізуючи вплив теплопровідного включення примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні рядового примикання.

Термічно однорідна ділянка огорожувальної конструкції — компонент А (стіна) — є ідентичною тій, що розглянута в п. 3.1.1. Інша частина конструктивного вузла – вікно, при визначенні лінійного коефіцієнта теплопередачі виступатиме як компонент Б (таблиця 3.16). Результати розрахунку лінійного коефіцієнта теплопередачі зведені в таблицю 3.28.

Таблиця 3.28 – Результати моделювання покращеного вузла примикання віконної конструкції до зовнішньої стіни у зоні рядового сполучення

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
2D модель	Внутрішні обміри	0,3194	42,0	1,75	23,51	9,82%
	Зовнішні обміри	0,3770	42,0	1,48	23,51	9,82%
Компонент А, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2146	42,0	1,10	9,91	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2146	42,0	1,10	9,91	0,00%
Компонент Б						
Вікно	Внутрішні обміри	1,2660	42,0	0,242	12,88	7,84%
	Зовнішні обміри	1,2020	42,0	0,255	12,88	7,84%
Результати розрахунку		$L^{2D}$ , (Вт/м·К)	$U \cdot l$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ -середнє, (Вт/м·К)	
Внутрішні обміри		0,5596	0,5427	0,017	<b>0,017</b>	
Зовнішні обміри		0,5597	0,5427	0,017		

Видно, що запропоноване покращення посприяло значному зменшенню лінійного коефіцієнта теплопередачі до рівня 0,017 Вт/(м·К). Отриманий результат підтверджує, що виносне розміщення рами у площину теплоізоляції є ефективним, зменшуючи лінійний коефіцієнт теплопередачі  $\psi$  і забезпечує надійний температурний режим на внутрішній поверхні огорожувальних конструкцій. Це є доцільним підходом для будівель, що проєктуються відповідно до сучасних стандартів майже нульового енергоспоживання будівель (nZEB).

### 3.1.6 Вузол примикання плити перекриття підлоги над неопалюваним підвалом до стіни цоколя

На рисунку 3.45 наведено вузол примикання конструкції підлоги над неопалюваним підвалом до стіни цоколя. Зовнішня цегляна стіна утеплена мінеральною ватою товщиною 150 мм. Частина цоколю утеплена шаром

екструдованого пінополістиролу товщиною 100 мм до рівня ґрунту. Перекриття між опалювальним поверхом та підвалом залізобетонне, товщиною 220 мм, має теплоізоляційну подушку з екструдованого пінополістиролу товщиною 30 мм. Параметри граничних умов застосованих при моделюванні наведені в таблиці 3.1. Теплотехнічні властивості матеріалів конструктивного вузла наведено в таблиці 3.29.

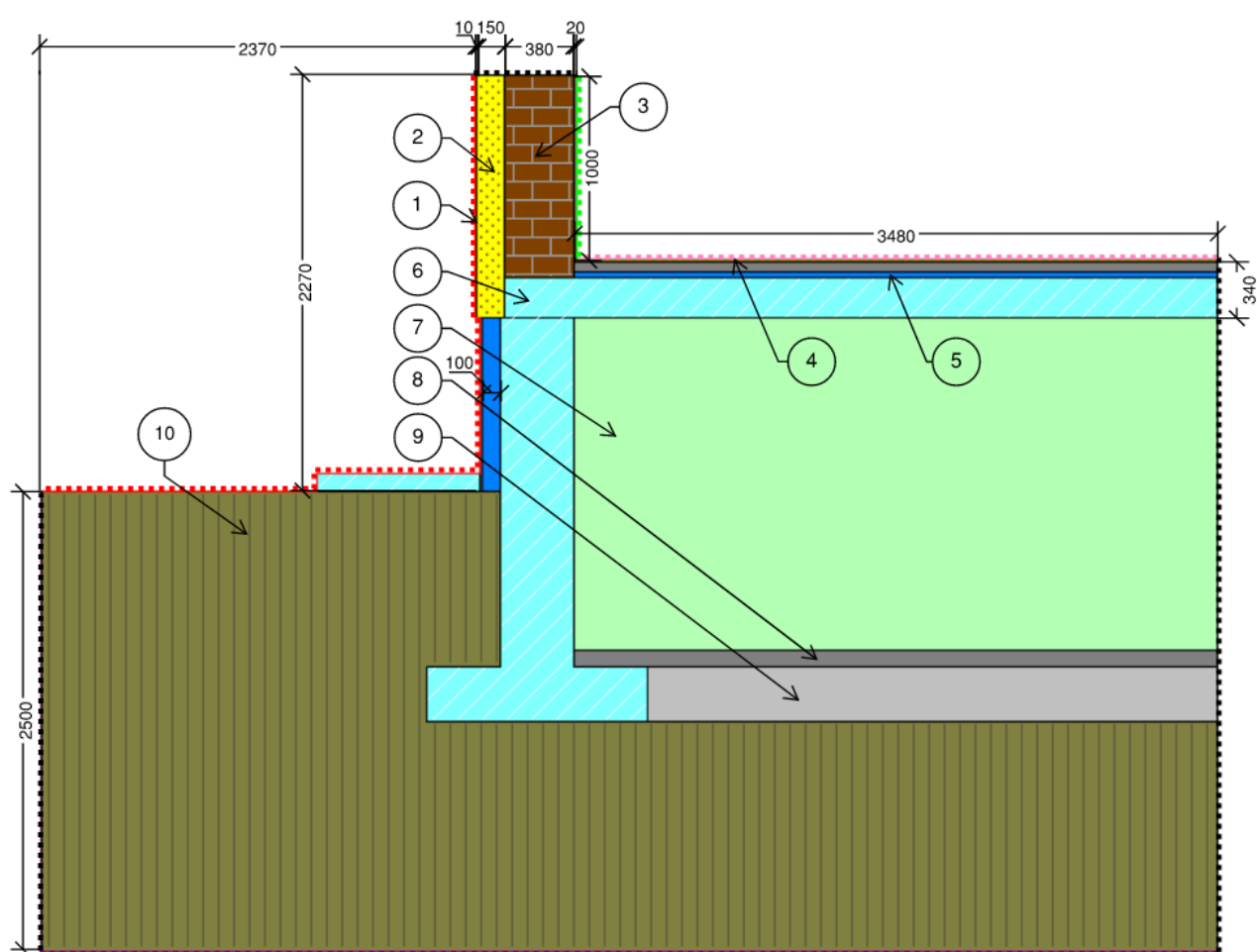


Рисунок 3.45 – Схема вузла примикання плити перекриття підлоги над неопалюваним підвалом до стіни цоколя

Наведений вище конструктивний вузол було змодельовано в програмному середовищі THERM. Результати моделювання зображено на рисунках 3.46 та 3.47.

Таблиця 3.29 – Властивості матеріалів вузла примикання плити перекриття підлоги над неопалюваним підвалом до стіни цоколя

Умовні позначки	Матеріал	$\lambda$ , Вт/м·К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	Розчин цементно-піщаний	0,93	1800
2	Утеплювач мінераловатний	0,050	150
3	Цегляна кладка (керамічна)	0,81	1800
4	Дерев'яне покриття підлоги (дуб, поперек волокон)	0,23	700
5	Екструдований пінополістирол	0,037	35
6	Залізобетон	2,04	2500
7	Повітряний прошарок (автоматична симуляція в THERM)	-	-
8	Бетон на гравії або щебні з природного каменю	1,86	2400
9	Пісок для будівельних робіт	0,58	1600
10	Ґрунт	2,00	-

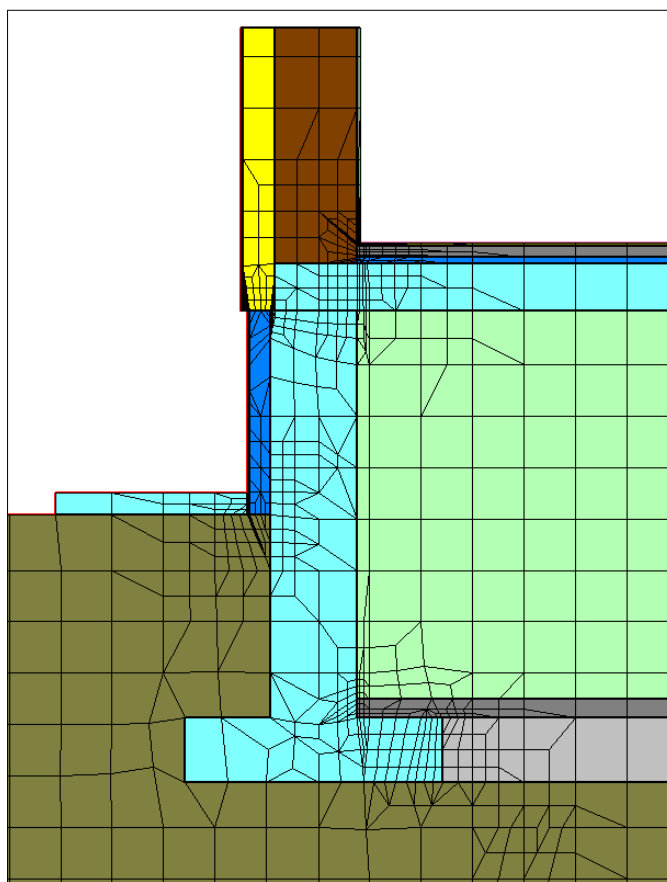


Рисунок 3.46 – Застосована сітка FEM у моделі конструктивного вузла

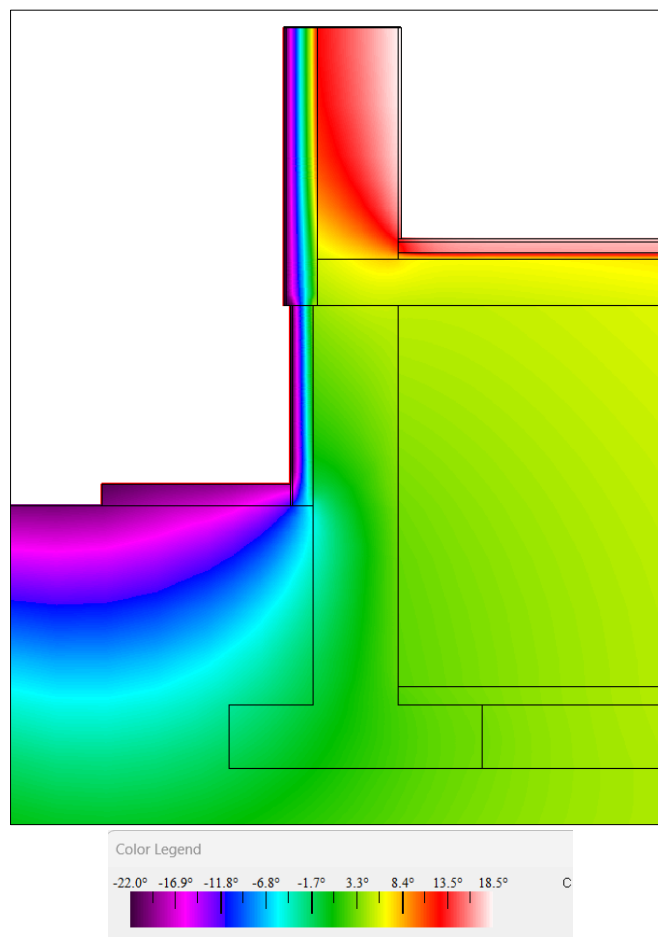


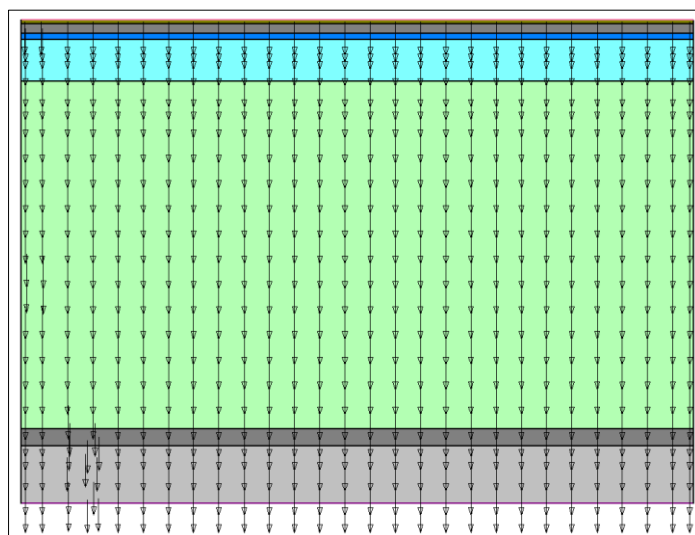
Рисунок 3.47 – Інфрачервоне зображення розподілу температур у фрагменті контакту цоколя і ґрунту

Результати чисельного моделювання в середовищі THERM свідчать про виражене теплопровідне включення: спостерігається суттєве викривлення ізотерм у зоні стику цоколя та ґрунту. Ізотерма  $+10^{\circ}\text{C}$  проходить поблизу внутрішньої поверхні цокольної ділянки, що створює ризик утворення конденсату у конструкції. У напрямку до неопалюваного підвалу температура знижується до критичних значень, а в зоні ґрунту спостерігається температура нижче  $0^{\circ}\text{C}$ , що вказує на значні тепловтрати. Основною причиною такої ситуації є відсутність неперервної теплоізоляції на рівні глибше за відмітку поверхні ґрунту.

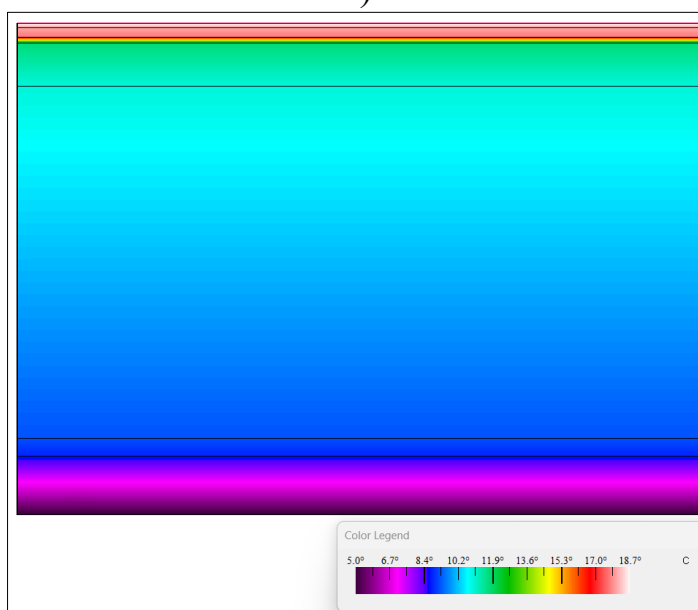
Термічно однорідна ділянка огорожувальної конструкції — компонент А (стіна) — є ідентичною тій, що розглянута в п. 3.1.1.

На рисунку 3.48 зображено результати моделювання термічно однорідної ділянки огорожувальної конструкції – компонент Б (плита перекриття).





а)



б)

Рисунок 3.48 – Модель однорідного елемента конструктивного вузла: а) розподіл векторів густини теплового потоку; б) інфрачервоне зображення розподілу температур

Після побудови моделі вузла та аналізу розподілу температурних полів і теплових потоків, проведено розрахунок лінійного коефіцієнта теплопередачі. Результати моделювання та розрахунків були зведені в таблицю 3.30.

Таблиця 3.30 – Результати моделювання базового вузла плити перекриття підлоги над неопалюваним підвалом до стіни цоколя

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
2D модель	Внутрішні обміри	0,3175	42,0	4,48	59,74	8,59%
	Зовнішні обміри	0,1047	42,0	13,59	59,76	8,59%
Компонент А, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2732	42,0	1,00	11,47	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2732	42,0	1,00	11,47	0,00%
Компонент Б, однорідний						
Плита перекриття	Внутрішні обміри	0,4945	15,0	3,50	25,96	0,00%
	Зовнішні обміри	0,4945	15,0	3,50	25,96	0,00%
Результати розрахунку		$L^{2D}$ , (Вт/м·К)	$U \cdot l$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ -середнє, (Вт/м·К)	
Внутрішні обміри		1,4224	0,89	0,531	<b>0,531</b>	
Зовнішні обміри		1,4229	0,89	0,532		

На основі чисельного моделювання температурного поля у вузлі примикання плити перекриття підлоги над неопалюваним підвалом до стіни цоколя було розраховано значення лінійного коефіцієнта теплопередачі  $\psi = 0,531$  Вт/(м·К), що свідчить про високий рівень тепловтрат у цій зоні. Такий показник значно перевищує рекомендовані значення для енергоефективних будівель і підтверджує наявність інтенсивного теплопровідного включення.

Для покращення показника  $\psi$  пропонується збільшити утеплення теплоізоляційного шару зовнішньої стіни до 200 мм, додати 150 мм теплоізоляційного шару до плити перекриття, а утеплення цокольної частини збільшити до 150 мм та заглибити теплоізоляцію стіни підвалу до рівня фундаментної подушки (рисунок 3.49). Теплотехнічні властивості матеріалів вказано в таблиці 3.31. Результати моделювання наведено на рисунках 3.50 та 3.51.

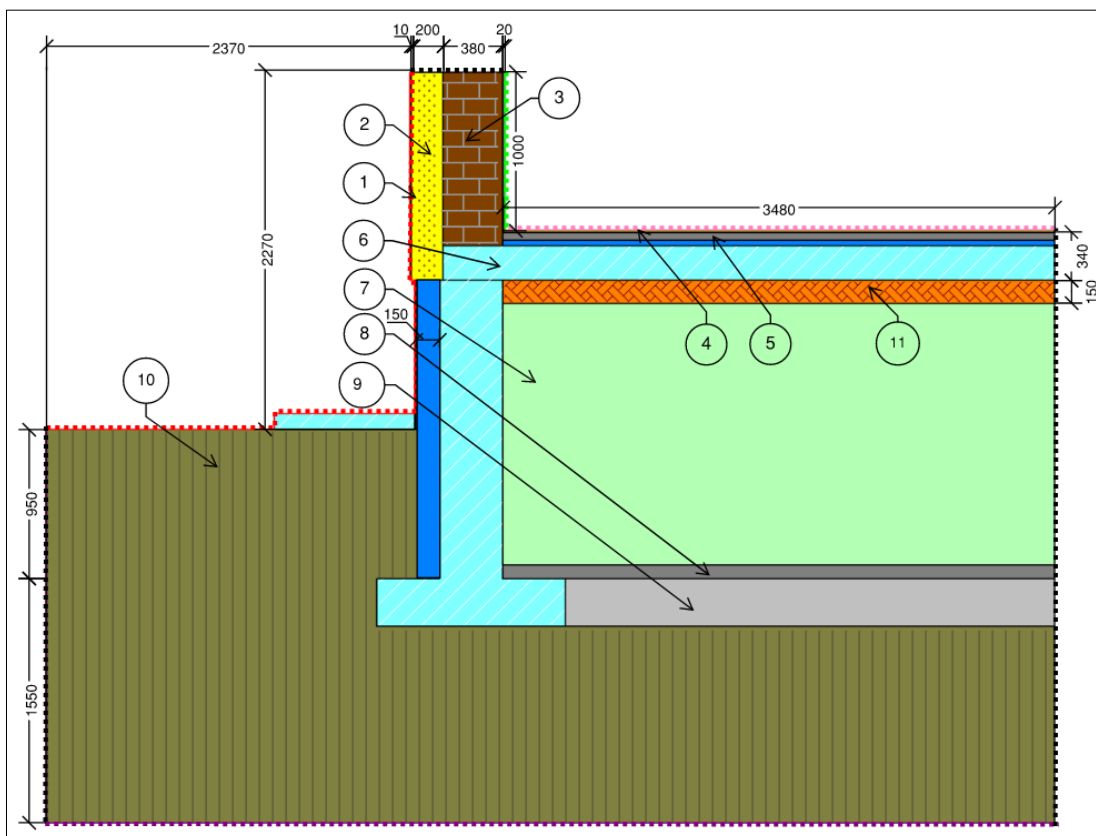


Рисунок 3.49 – Схема покращеного вузла примикання плити перекриття підлоги над неопалюваним підвалом до стіни цоколя

Таблиця 3.31 – Властивості матеріалів вузла примикання плити перекриття підлоги над неопалюваним підвалом до стіни цоколя

Умовні позначки	Матеріал	$\lambda$ , Вт/м·К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	Розчин цементно-піщаний	0,93	1800
2	Утеплювач мінераловатний	0,050	150
3	Цегляна кладка (керамічна)	0,81	1800
4	Дерев'яне покриття підлоги (дуб, поперек волокон)	0,23	700
5	Екструдований пінополістирол	0,037	35
6	Залізобетон	2,04	2500
7	Повітряний прошарок (автоматична симуляція в THERM)	-	-
8	Бетон на гравії або щебні з природного каменю	1,86	2400
9	Пісок для будівельних робіт	0,58	1600
10	Ґрунт	2,00	-
11	Утеплювач мінераловатний	0,053	200

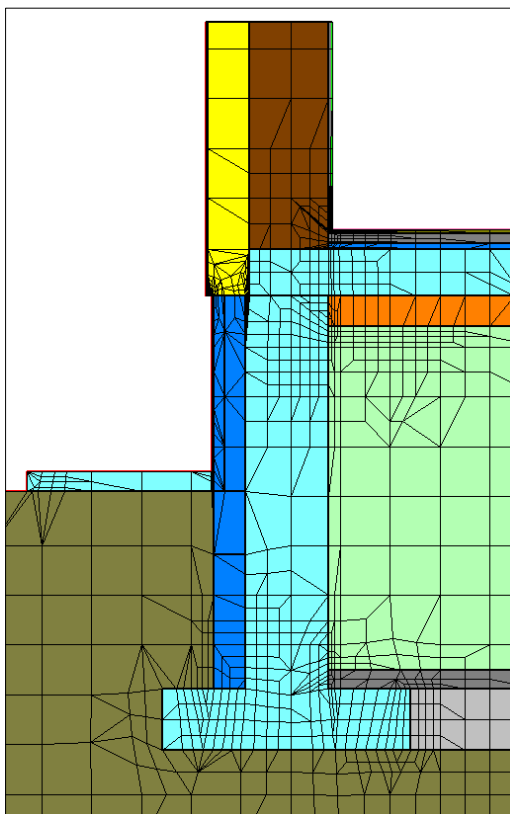


Рисунок 3.50 – Застосована сітка FEM у моделі конструктивного вузла

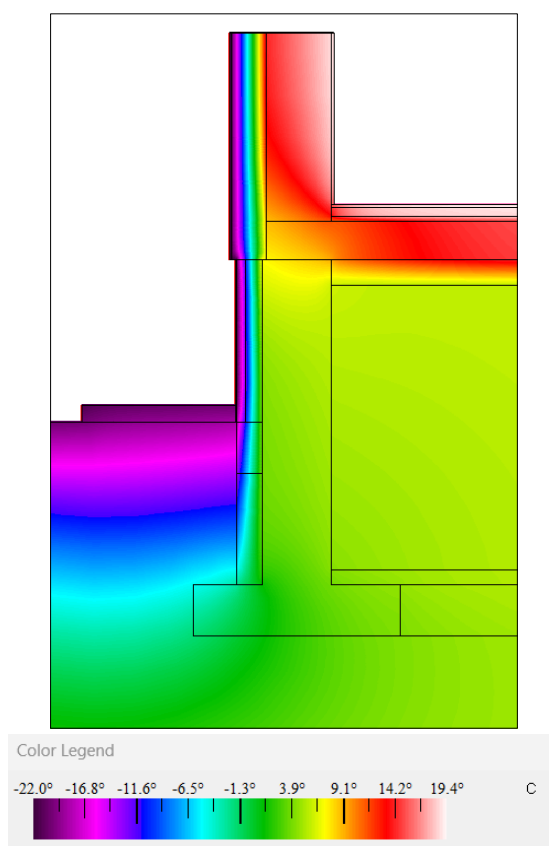


Рисунок 3.51 – Інфрачервоне зображення розподілу температур у фрагменті контакту цоколя і ґрунту

Результати моделювання свідчать про суттєве покращення теплоізоляційної ефективності конструкції в порівнянні з базовим варіантом. Ізотерми в зоні стику мають більш плавний і рівномірний характер, що вказує на зменшення інтенсивності теплового потоку через теплопровідне включення. Відмічається підвищення температури на внутрішній поверхні та, відповідно, покращення комфортних умов в приміщенні.

Термічно однорідна ділянка огорожувальної конструкції — компонент А (стіна) — є ідентичною тій, що розглянута в п. 3.1.1. На рисунку 3.52 зображено результати моделювання термічно однорідної ділянки огорожувальної конструкції — компонент Б (плита перекриття).

Після побудови моделі вузла в середовищі THERM та аналізу розподілу температурних полів і теплових потоків, було проведено розрахунок лінійного коефіцієнта теплопередачі. Результати моделювання та розрахунків були зведені в таблицю 3.32.

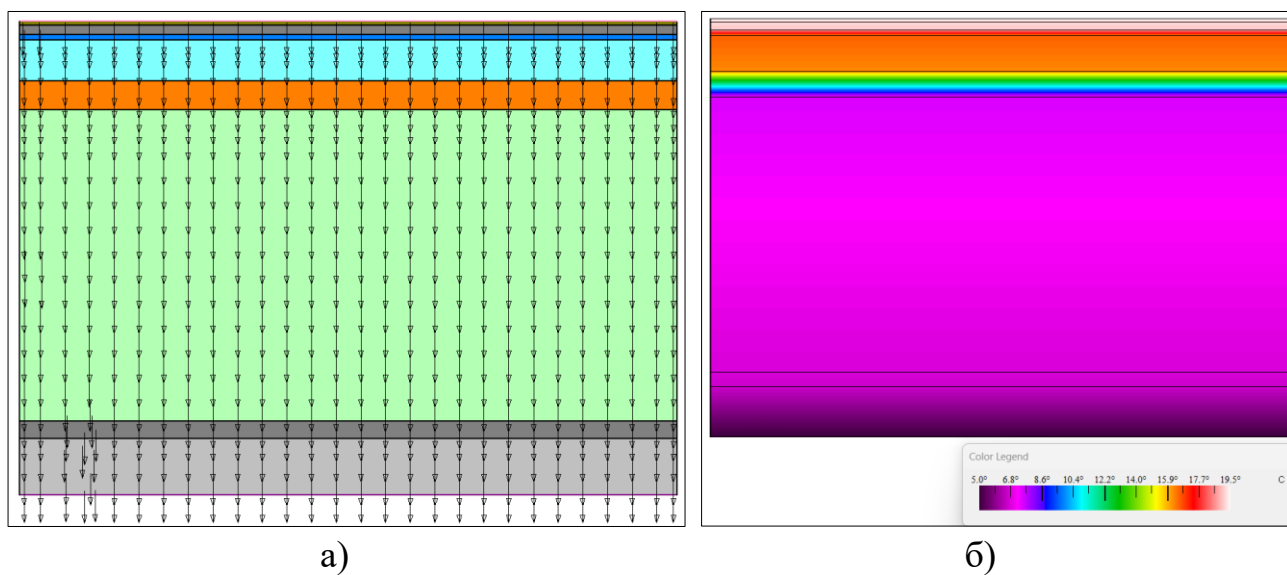


Рисунок 3.52 – Модель однорідного елемента конструктивного вузла: а) розподіл векторів густини теплового потоку; б) інфрачервоне зображення розподілу температур

Таблиця 3.32 – Результати моделювання базового вузла плити перекриття підлоги над неопалюваним підвалом до стіни цоколя

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
2D модель	Внутрішні обміри	0,1624	42,0	4,48	30,56	8,45%
	Зовнішні обміри	0,0538	42,0	13,54	30,59	8,45%
Компонент А, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2146	42,0	1,00	9,01	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2146	42,0	1,00	9,01	0,00%
Компонент Б, однорідний						
Плита перекриття	Внутрішні обміри	0,2054	15,0	3,50	10,78	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2054	15,0	3,50	10,78	0,00%
Результати розрахунку		$L^{2D}$ , (Вт/м·К)	$U \cdot l$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ -середнє, (Вт/м·К)	
Внутрішні обміри		1,4224	0,89	0,531	<b>0,257</b>	
Зовнішні обміри		1,4229	0,89	0,532		

Отримане значення лінійного коефіцієнта теплопередачі  $\psi = 0,257$  Вт/(м·К) для покращеного вузла свідчить про суттєве зниження тепловтрат порівняно з базовим варіантом, для якого  $\psi$  становило 0,531 Вт/(м·К). Зменшення на 51,6 % вказує на ефективність запропонованих рішень. Покращений вузол демонструє більш сприятливий температурний режим у критичній зоні стику плити перекриття з зовнішньою стіною. Таким чином, модифікація конструктивного рішення відповідає мінімальним вимогам nZEB в Україні та може бути рекомендована для реалізації в будівлях із підвищеними вимогами до рівня теплозахисту.

### 3.1.7 Вузол примикання конструкції підлоги по ґрунту до зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією

На рисунку 3.53 наведено вузол примикання конструкції підлоги по ґрунту до зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією.

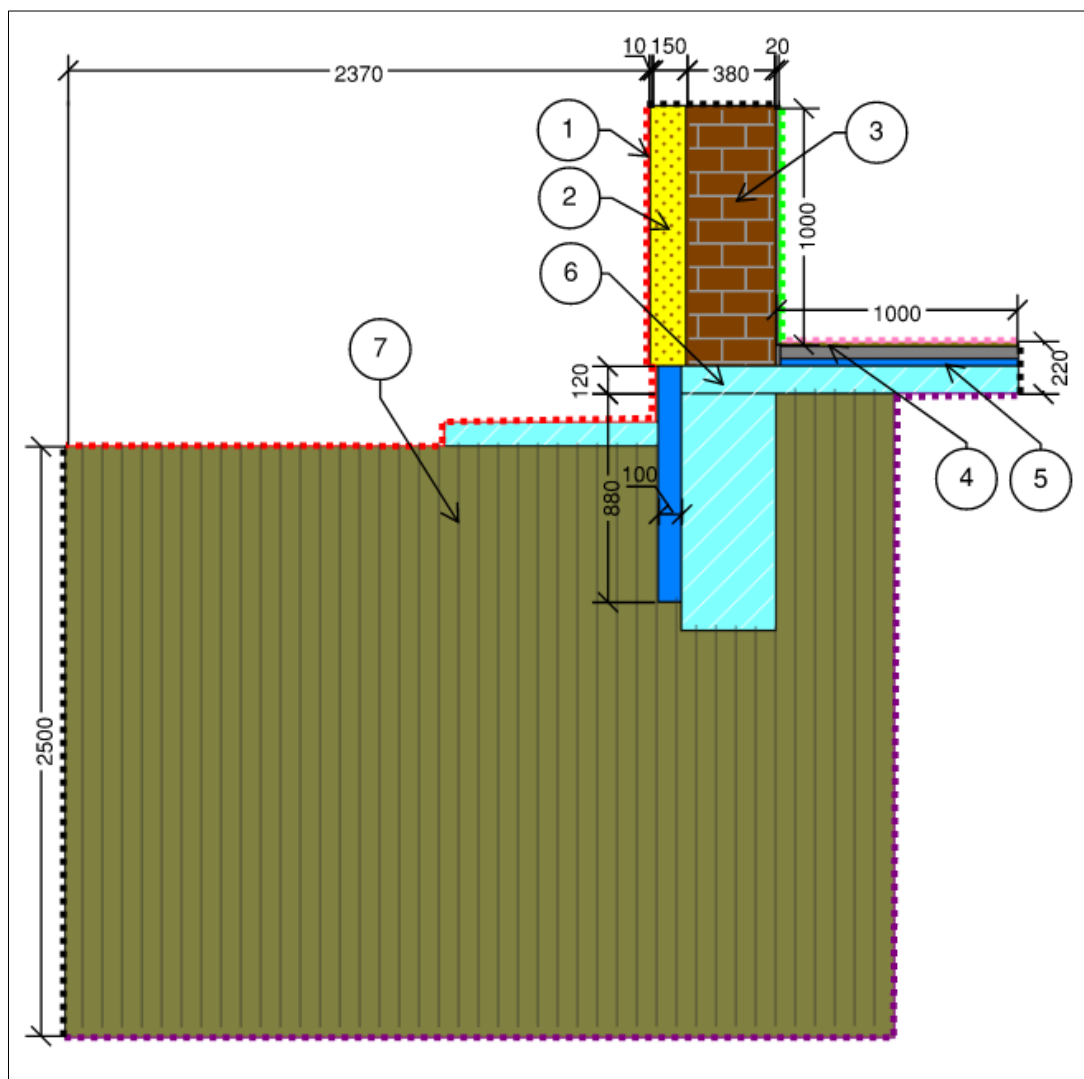


Рисунок 3.53 – Схема базового вузла конструкції підлоги по ґрунту до зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією

Зовнішня цегляна стіна утеплена мінеральною ватою товщиною 150 мм. Фундаментна стіна утеплена шаром екструдованого пінополістиролу товщиною 100 мм на довжину 1 м. Плита між опалювальним поверхом та ґрунтом залізобетонна, товщиною 120 мм, має теплоізоляційну подушку з екструдованого пінополістиролу товщиною 30 мм. Параметри граничних умов застосованих при моделюванні наведені в таблиці 3.1. Теплотехнічні властивості матеріалів конструктивного вузла наведено в таблиці 3.33.

Таблиця 3.33 – Властивості матеріалів вузла конструкції підлоги по ґрунту до зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією

Умовні позначки	Матеріал	$\lambda$ , Вт/м·К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	Розчин цементно-піщаний	0,93	1800
2	Утеплювач мінераловатний	0,050	150
3	Цегляна кладка (керамічна)	0,81	1800
4	Дерев'яне покриття підлоги (дуб, поперек волокон)	0,23	700
5	Екструдований пінополістирол	0,037	35
6	Залізобетон	2,04	2500
10	Ґрунт	2,00	-

Наведений вище конструктивний вузол було змодельовано в програмному середовищі THERM. Результати моделювання зображено на рисунках 3.54 – 3.56.

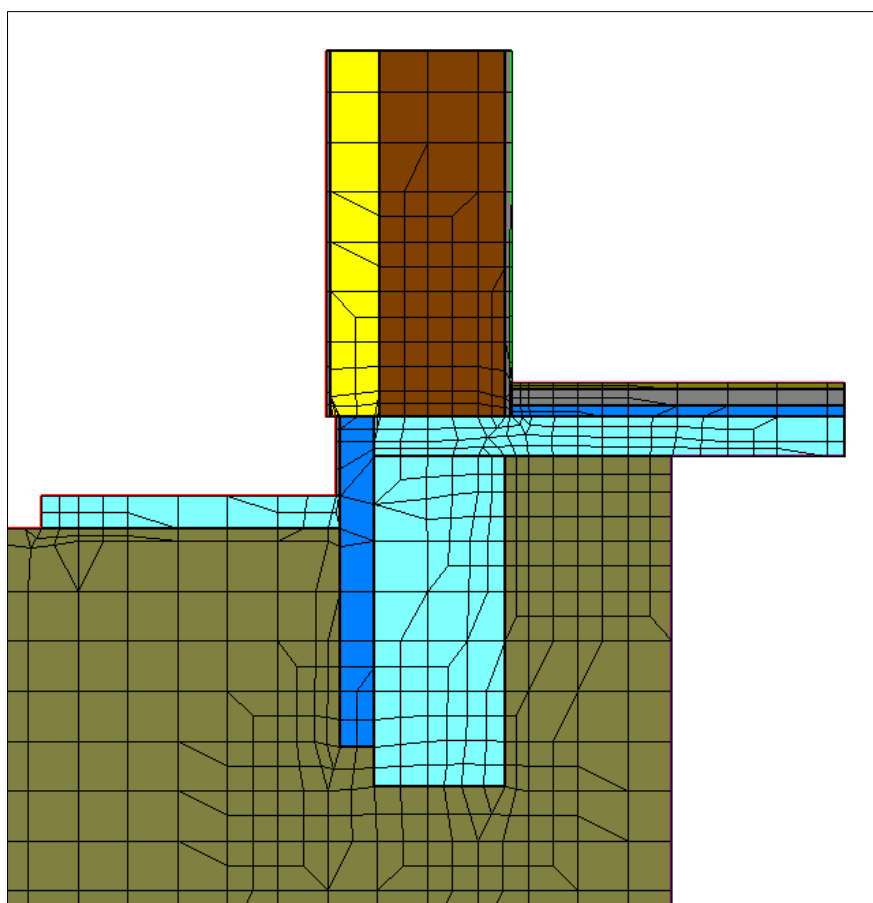


Рисунок 3.54 – Застосована сітка FEM у моделі конструктивного вузла



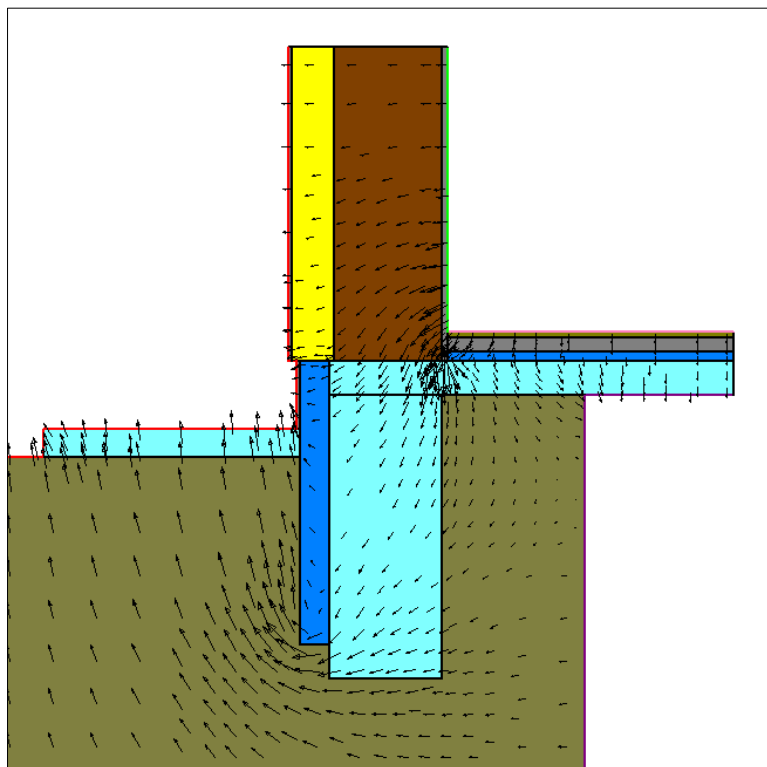


Рисунок 3.55 – Розподіл векторів густини теплового потоку у моделі конструктивного вузла

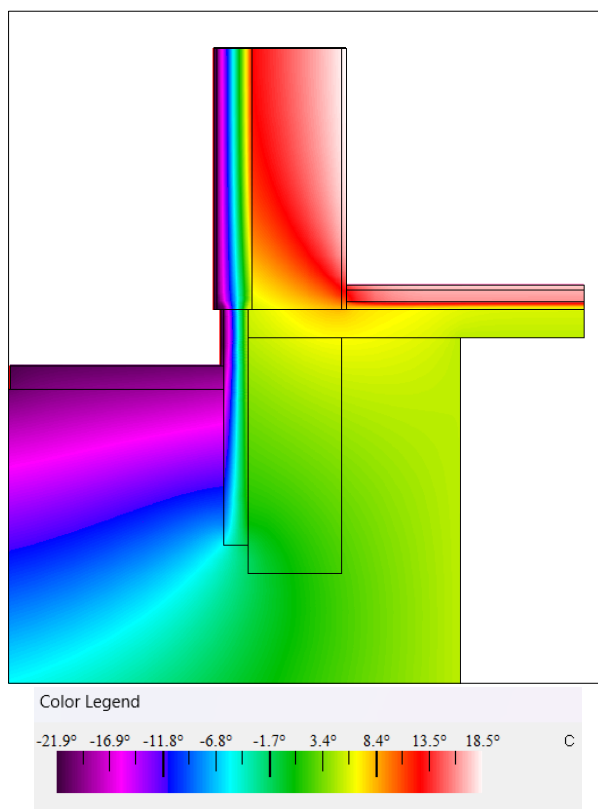


Рисунок 3.56 – Інфрачервоне зображення розподілу температур у моделі конструктивного вузла

Проаналізувавши результати чисельного моделювання у програмі THERM для вузла примикання конструкції підлоги по ґрунту до зовнішньої стіни, необхідно зауважити, що ізотерми згущуються біля стику утеплювача зовнішньої стіни з плитою підлоги, що вказує на локалізовані тепловтрати. Напрямки теплового потоку, візуалізовані векторною діаграмою, також свідчать про підсилену теплопередачу у ділянці стикування стіни та підлоги. В той же час, розподіл температур підтверджує ефективність вертикального шару теплоізоляції на зовнішній стіні, який ефективно тримає зони знижених температур далі від внутрішнього середовища приміщення.

Термічно однорідна ділянка огорожувальної конструкції — компонент А (стіна) — є ідентичною тій, що розглянута в п. 3.1.1. На рисунку 3.57 зображено результати моделювання термічно однорідної ділянки огорожувальної конструкції — компонент Б (плита підлоги).

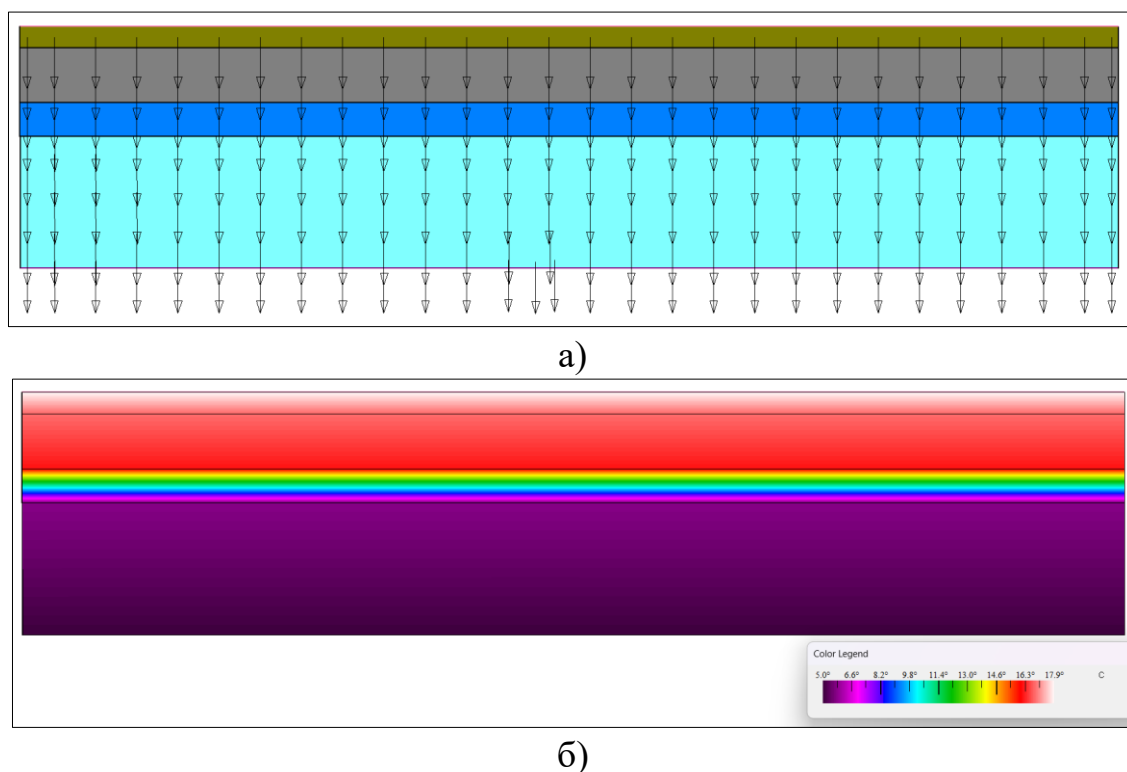


Рисунок 3.57 – Модель однорідного елемента конструктивного вузла: а) розподіл векторів густини теплового потоку; б) інфрачервоне зображення розподілу температур

Після побудови моделі вузла в середовищі THERM та аналізу розподілу температурних полів і теплових потоків, було проведено розрахунок лінійного коефіцієнта теплопередачі. Результати моделювання та розрахунків були зведені в таблицю 3.34.

Таблиця 3.34 – Результати моделювання базового вузла конструкції підлоги по ґрунту до зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
2D модель	Внутрішні обміри	0,3928	42	2,00	33,00	9,78%
	Зовнішні обміри	0,0734	42	10,70	32,99	9,78%
Компонент А, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2732	42,0	1,00	11,47	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2732	42,0	1,00	11,47	0,00%
Компонент Б, однорідний						
Плита підлоги	Внутрішні обміри	0,8421	15,0	1,00	12,63	0,00%
	Зовнішні обміри	0,8419	15,0	1,00	12,63	0,00%
Результати розрахунку		$L^{2D}$ , (Вт/м·К)	$U \cdot l$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ -середнє, (Вт/м·К)	
Внутрішні обміри		0,7856	0,5740	0,212	<b>0,212</b>	
Зовнішні обміри		0,7854	0,5739	0,212		

На підставі результатів чисельного моделювання у середовищі THERM для вузла примикання конструкції підлоги по ґрунту до зовнішньої стіни було визначено значення лінійного коефіцієнта теплопередачі  $\psi = 0,212$  Вт/(м·К). Варто зауважити, що отримана величина лінійного коефіцієнта відповідає мінімальним вимогам прийнятим Україні для будівель з близьким до нульового рівня енергоспоживання.

Базовий вузол було покращено шляхом збільшення товщини утеплення зовнішньої цегляної та фундаментної стін (рисунок 3.58).

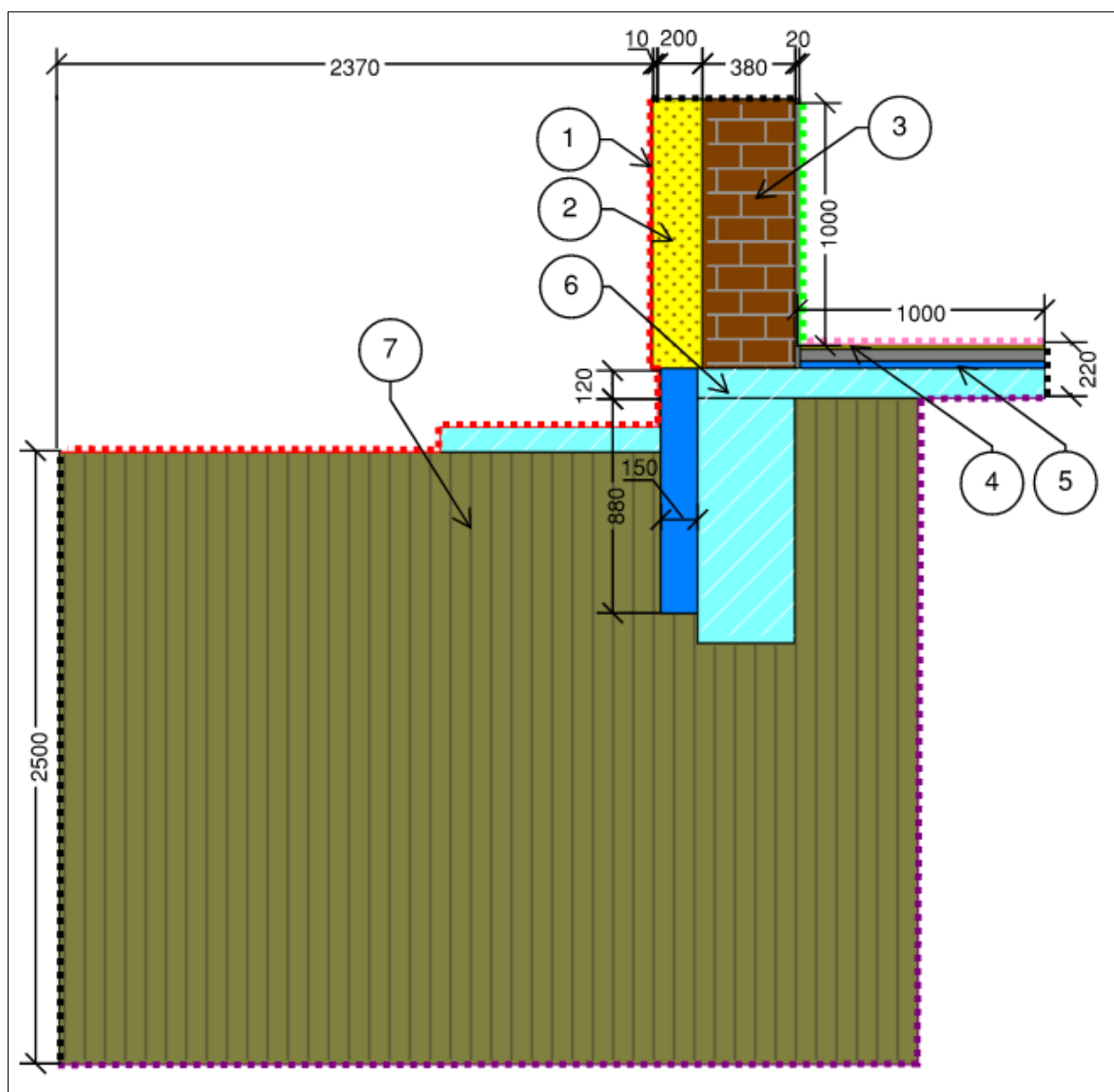


Рисунок 3.58 – Схема покращеного вузла конструкції підлоги по ґрунту до зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією

Товщина теплоізоляційного шару зовнішньої стіни була збільшена до 200 мм, а фундаментної стіни до 150 мм. Теплотехнічні властивості матеріалів залишаються такими, як і в базовій конструкції та вказані в таблиці 3.33. Результати моделювання наведено на рисунках 3.59 – 3.61.

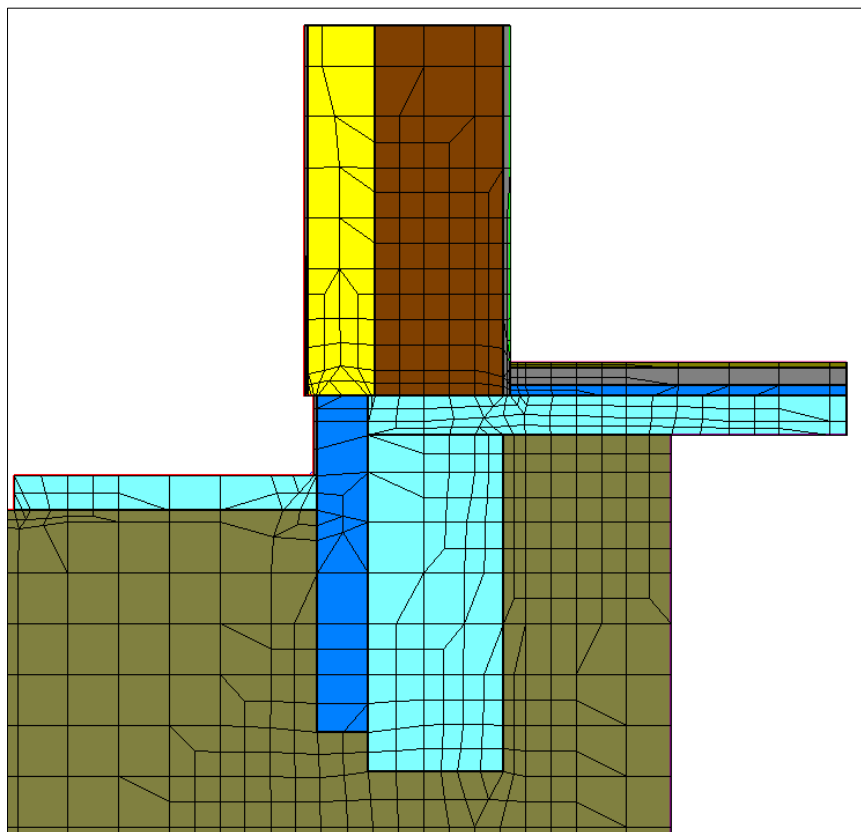


Рисунок 3.59 – Застосована сітка FEM у моделі конструктивного вузла

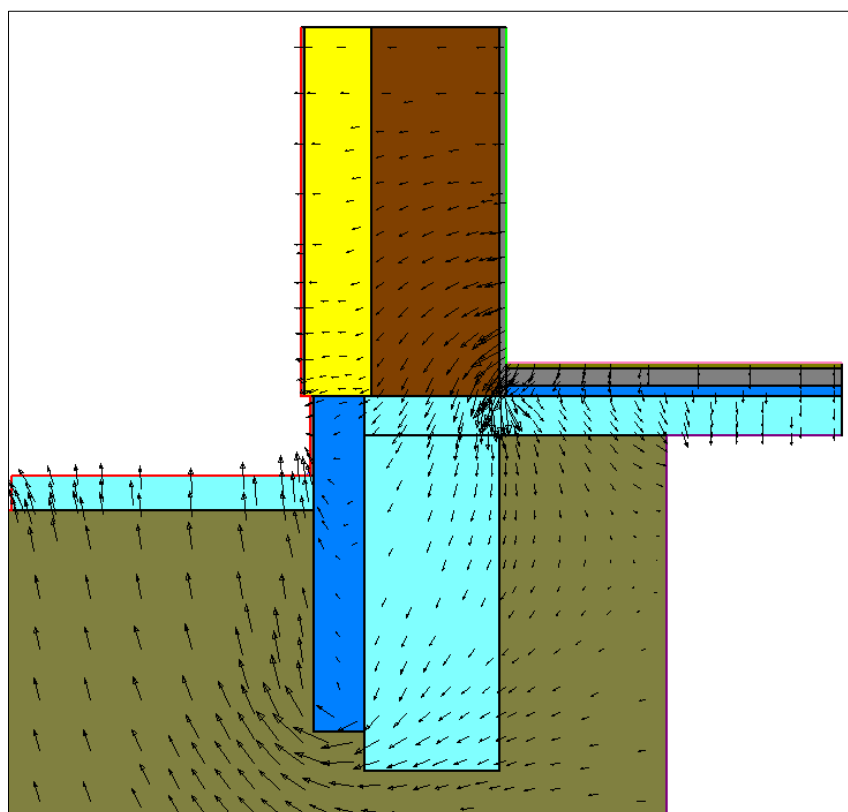


Рисунок 3.60 – Розподіл векторів густини теплового потоку у моделі конструктивного вузла

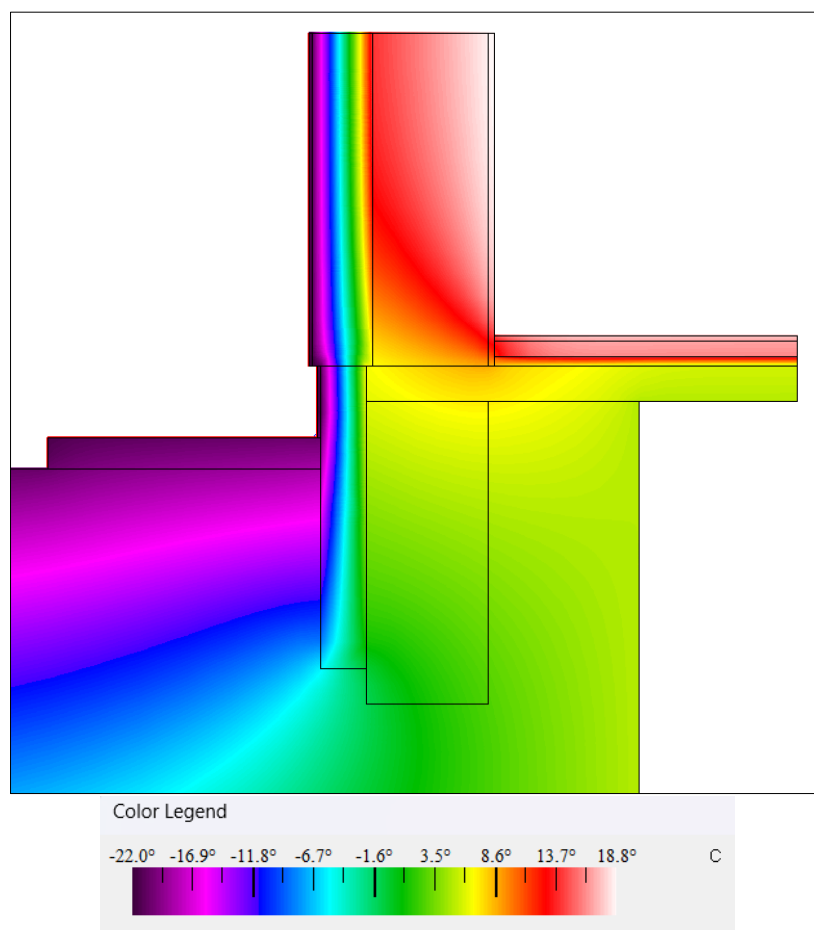


Рисунок 3.61 – Інфрачервоне зображення розподілу температур у моделі конструктивного вузла

Проаналізувавши результати чисельного моделювання у середовищі THERM для вузла примикання конструкції підлоги по ґрунту до зовнішньої стіни, необхідно зауважити, що великого відхилення від результатів базової конструкції не виявляється. Ізотерми також згущуються біля стику утеплювача зовнішньої стіни з плитою підлоги. З розподілу температур видно, що відбувся незначний зсув причиною якому є збільшена товщина теплоізоляції.

Термічно однорідна ділянка огорожувальної конструкції — компонент А (стіна) — є ідентичною тій, що розглянута в п. 3.1.1. На рисунку 3.62 зображено результати моделювання термічно однорідної ділянки огорожувальної конструкції — компонент Б (плита підлоги). Результати моделювання та розрахунків були зведені в таблицю 3.35.

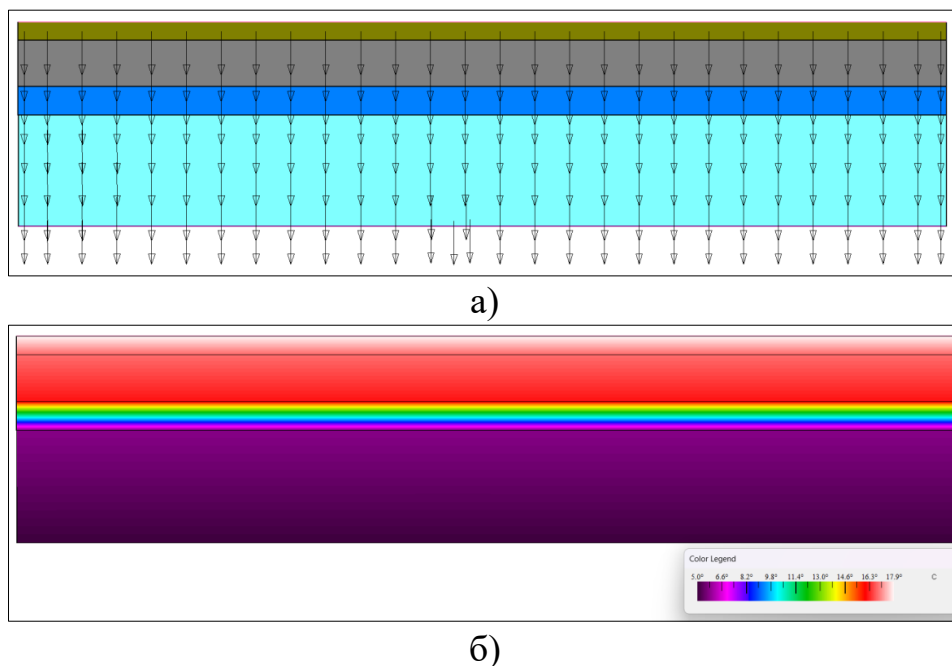


Рисунок 3.62 – Модель однорідного елемента вузла: а) розподіл векторів густини теплового потоку; б) інфрачервоне зображення розподілу температур

Таблиця 3.35 – Результати моделювання базового вузла конструкції підлоги по ґрунту до зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією

Конструктивний вузол		$U$ , (Вт/м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta T$ , К	$l$ , м	$\Phi$ , Вт/м	Похибка, %
2D модель	Внутрішні обміри	0,3623	42,0	2,00	30,43	4,47%
	Зовнішні обміри	0,0680	42,0	10,65	30,42	4,47%
Компонент А, однорідний						
Стіна	Внутрішні обміри	0,2146	42,0	1,00	9,01	0,00%
	Зовнішні обміри	0,2146	42,0	1,00	9,01	0,00%
Компонент Б, однорідний						
Плита підлоги	Внутрішні обміри	0,8491	15,0	1,00	12,74	0,00%
	Зовнішні обміри	0,8488	15,0	1,00	12,73	0,00%
Результати розрахунку		$L^{2D}$ , (Вт/м·К)	$U \cdot l$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ , (Вт/м·К)	$\Psi$ -середнє, (Вт/м·К)	
Внутрішні обміри		0,7246	0,5179	0,207	<b>0,207</b>	
Зовнішні обміри		0,7242	0,5177	0,206		

На основі чисельного моделювання покращеного вузла примикання конструкції підлоги по ґрунту до зовнішньої стіни, у якому товщину

теплоізоляційного шару зовнішньої стіни збільшено до 200 мм, а для фундаментної стіни — до 150 мм, було отримано значення лінійного коефіцієнта теплопередачі  $\psi = 0,207 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Цей результат свідчить про незначне зниження інтенсивності тепловтрат у зоні стикування в порівнянні з базовою конструкцією, що також підтверджується характером розподілу теплового потоку на ізотермічній карті. Основні теплові потоки сконцентровані у товщі ґрунту, а зона внутрішньої поверхні залишилася рівномірно теплою, без значних локальних переохолоджень. Таким чином, даний вузол також може бути рекомендований для використання в енергоефективних і пасивних будівлях.

### **Висновки до розділу 3**

У третьому розділі дисертаційного дослідження було здійснено системний аналіз найбільш поширених конструктивних вузлів огорожувальних конструкцій з лінійними теплопровідними включеннями. Проведено чисельне моделювання температурних полів і густини теплового потоку в середовищі THERM з метою оцінки впливу цих вузлів на загальні тепловтрати та визначення величин лінійного коефіцієнта теплопередачі  $\psi$ .

Моделювання охоплювало типові вузли, такі як: примикання зовнішніх стін до міжповерхового перекриття, зону кутового сполучення стін, примикання плит перекриття дахів і балконів до стіни, різні варіанти примикання віконних конструкцій до стін (зона перемички, підвіконня та рядового сполучення), примикання підлоги над неопалюваним підвалом до стіни цоколя та примикання конструкції підлоги по ґрунту. Для кожного вузла було змодельовано як базову, так і запропоновану покращену конфігурацію із застосуванням наступних рішень: збільшення товщини утеплювача, виносний монтаж вікон, використання теплоізоляційних елементів з низькою теплопровідністю.

Результати розрахунків показали, що:



- значення  $\psi$ -факторів у базових вузлах у переважній більшості випадків значною мірою перевищують допустимі межі для будівель з майже нульовим енергоспоживанням (nZEB), що вказує на суттєві локальні теплові втрати;
- оптимізація конструкцій вузлів дозволяє знизити значення  $\psi$  до рівня на 30–70 % нижче, залежно від конфігурації та застосованих матеріалів та підходів;
- найбільший ефект покращення спостерігається при ліквідації суцільних бетонних елементів, які переривають теплоізоляцію (балкон-стіна, парапет-стіна), та при зміщенні віконної конструкції в зону утеплювача (виносний монтаж);
- у зонах кутових стиків та примикань плит балконів/перекрыттів навіть незначні порушення безперервності утеплення призводять до різкого зростання щільності теплового потоку;
- використання програмного забезпечення THERM дозволило не лише візуалізувати та локалізувати проблемні зони, але й отримати кількісні параметри для об'єктивного порівняння рішень.

Таким чином, проведене дослідження підтвердило доцільність застосування чисельного моделювання для оптимізації вузлів огорожувальних конструкцій з метою зниження тепловтрат, а також були отримані результати, які мають практичне значення для розробки рекомендацій щодо проєктування вузлів у сучасних будівлях з підвищеними вимогами до енергоефективності. Відповідно, також засвідчена необхідність удосконалення української нормативної бази з каталожними даними вузлів та значень теплопровідних включень з урахуванням сучасних матеріалів, технологій і вимог nZEB.

## РОЗДІЛ 4 ЕНЕРГЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОПОТРЕБИ НА ОПАЛЕННЯ ТА ОХОЛОДЖЕННЯ З ВРАХУВАННЯМ ТЕПЛОПРОВІДНИХ ВКЛЮЧЕНЬ

В дослідженні постає актуальне питання оцінки впливу теплопровідних включень, визначених та проаналізованих у попередньому розділі, на показники енергоефективності. В цьому контексті доцільніше розглядати річну енергетичну потребу на опалення та охолодження, а не загальне енергоспоживання. Такий підхід є методично обґрунтованим, оскільки дозволяє ізолювати вплив огорожувальних конструкцій та теплопровідних включень від втрат, пов'язаних із роботою інженерного обладнання. Це забезпечує чистоту порівняння різних сценаріїв термічного захисту будівлі, де єдиною змінною є теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій. Енергетична потреба є більш наочною метрикою у контексті оцінки ефективності проєктних рішень із зменшення теплопровідних містків, оскільки вона безпосередньо відображає реальну зміну теплового навантаження на будівлю без впливу зовнішніх факторів (типу ККД систем або режиму експлуатації).

Для оцінки показників енергоефективності було використано енергетичне динамічне моделювання у програмному середовищі DesignBuilder, основні переваги та характеристики якого було детально описано в розділі 2 (пункт 3).

Логіку дослідження впливу теплопровідних включень на енергопотребу будівель у програмному середовищі DesignBuilder продемонстровано на рисунку 4.1.

На першому етапі дослідження розглядаються два типи будівель: будівля навчального закладу (громадська будівля) та багатоквартирний житловий будинок. Це дозволяє оцінити вплив теплопровідних включень (ТВ) в умовах різного функціонального призначення.

У блок *"Вхідні дані"* відносяться основні характеристики як: клімат (метеодані), геометрія будівлі, характеристики огорожувальних конструкцій (ОК), інженерні мережі, графіки експлуатації, внутрішні теплонадходження тощо. Цей

підхід забезпечує реалістичне енергетичне моделювання, засноване на повному профілі будівлі.

Для порівняння енергетичних витрат будівлі при застосуванні різних підходів до врахування теплопровідних включень були розглянуті сценарії огорожувальних конструкцій, в залежності від рівня теплоізоляції та значення опору теплопередачі ОК, визначеного різними способами в залежності від існуючих на сьогоднішній день вітчизняних методик детально описаних в розділі 1.1. Сформовані сценарії наведено в таблиці 4.1.

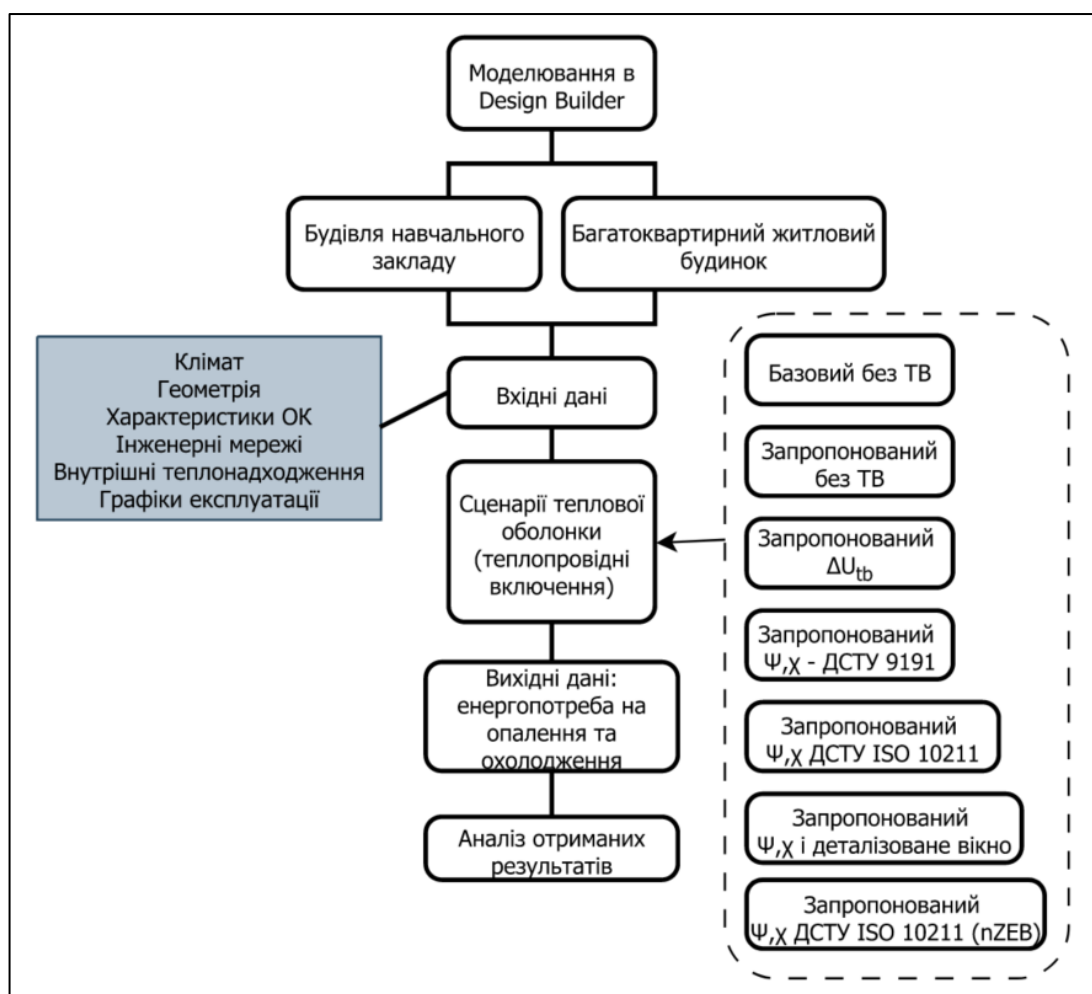


Рисунок 4.1 – Схема проведення енергетичного моделювання

Таблиця 4.1 – Результати лінійних коефіцієнтів теплопередачі

№	Сценарій	Опис сценарію
1	Базовий без ТВ	Характеризує існуючий (фактичний) стан теплової оболонки, без врахування теплопровідних включень. Внутрішні умови комфортності відповідають чинним нормативним вимогам.
2	Запропонований без ТВ	Покращений рівень опору теплопередачі огорожувальних конструкцій по основному полю відповідно до чинних вимог [10], без врахування теплопровідних включень. Наявна система рекуперації теплоти у системі механічної вентиляції будівлі (школи).
3	Запропонований $\Delta U_{tb}$	Аналогічний до попереднього сценарій, але з врахуванням поправочного коефіцієнта для опору теплопередачі зовнішніх стін відповідно до [8].
4	Запропонований $\Psi, \chi$ – ДСТУ 9191	Покращений рівень опору теплопередачі огорожувальних конструкцій з врахуванням теплопровідних включень відповідно до конструктивних вузлів які містяться у Додатках Г та Д до [15].
5	Запропонований $\Psi, \chi$ – ДСТУ 9191 і деталізоване вікно	Аналогічний до 4-го, сценарій враховує теплопровідні включення з Додатків Г та Д [15] разом з деталізованими теплотехнічними характеристиками вікна, які задаються окремо для склопакета та віконної рами.
6	Запропонований $\Psi, \chi$ – ISO 10211	Сценарій враховує теплопровідні включення базових вузлів ОК, розрахованих у розділі 3 даного дослідження у відповідності до вимог [18].
7	Запропонований $\Psi, \chi$ – ISO 10211, <i>nZEB</i> рівень	Теплотехнічні характеристики ОК та показників теплопровідних включень були покращенні до рівня <i>nZEB</i> . Теплопровідні включення проаналізовано у розділі 3 даного дослідження у відповідності до вимог [18].

#### 4.1 Енергетичне моделювання будівель

Для виконання енергетичного моделювання були використані кліматичні дані з міжнародної бази International Weather for Energy Calculations (IWEC) [67], спеціально створеної для розрахунків у сфері енергоефективності. Ця база даних ґрунтується на достовірних метеорологічних спостереженнях і забезпечує

комплексний набір кліматичних параметрів у форматі середньомісячних та годинних значень, а саме:

- температурні характеристики зовнішнього повітря (максимальні, мінімальні та середні значення), а також погодинні температурні криві;
- показники відносної вологості, представлені у щомісячному та погодинному форматі;
- компоненти сонячної радіації (горизонтальної та вертикальної), адаптовані до різних орієнтацій огорожувальних конструкцій;
- інформація щодо швидкості та напрямку вітру у щомісячному та погодинному виразі;
- рівень хмарності у вигляді частки покриття неба хмарами.

Застосування бази IWEC є виправданим завдяки її високій точності, відповідності реальним кліматичним умовам і широкому визнанню в галузі моделювання енергоспоживання будівель. Переваги використання цих кліматичних даних детально розглянуто в [68–70].

Відповідно до даних національного стандарту [3], основні кліматичні характеристики району розташування об'єктів моделювання вказані у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Кліматичні особливості розташування об'єкту

Розрахункова внутрішня температура за опалювальний період									20	°C	
Фактична середня внутрішня температура за опалювальний період									20		
Розрахункова температура зовнішнього повітря									-22		
Середня температура зовнішнього повітря за рік									8		
Середня температура зовнішнього повітря за опалювальний період									-0,1		
Тривалість опалювального періоду									176	діб	
Переважаючий напрям вітру									Пн	-	
Температура зона регіону									I		
Температура середня місячна, °C											
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-4,7	-3,6	1,0	9,0	15,2	18,3	19,8	19,0	13,9	8,1	1,9	-2,5

Значення лінійних коефіцієнтів теплопередачі вузлів огорожувальних конструкцій розрахованих у відповідності до вимог [13] та [18], які були визначені в розділі 3 даного дослідження, а також коефіцієнтів що використовувались з додатків Г та Д стандарту [15] узагальнено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Лінійні та точкові коефіцієнти теплопередачі ОК

Найменування вузла	Коефіцієнт теплопередачі			
	Додаток Г (ДСТУ 9191)	Базовий вузол (ISO 10211)	Покраще- ний вузол (ISO 10211)	
Примикання зовнішніх стін з цегли з опорядженням штукатуркою до міжповерхового перекриття	0,090	0,100	0,071	Лінійний $\psi$ , Вт/м·К
Кутове сполучення зовнішніх стін з цегли з опорядженням штукатуркою	0,135	0,181	0,155	
Примикання плити перекриття плаского даху до стіни та парапету	0,329	0,463	0,124	
Примикання зовнішніх стін з цегли з опорядженням штукатуркою до балконного перекриття	0,789	0,742	0,371	
Примикання віконної конструкції до зовнішніх стін у зоні перемички	0,081	0,115	0,015	
Примикання віконної конструкції до зовнішніх стін у зоні підвіконня	0,064	0,114	0,025	
Примикання віконної конструкції до зовнішніх стін у зоні рядового сполучення	0,071	0,095	0,017	
Примикання плити перекриття підлоги над неопалюваним підвалом до стіни цоколя*	-	0,531	0,257	
Примикання конструкції підлоги по ґрунту до зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією	0,980	0,212	0,207	
Вузол улаштування пластикового дюбелю з металевим стрижнем для кріплення теплоізоляційного шару в фасадній системі з опорядженням штукатуркою	0,005	0,005**	0,005**	Точковий $\chi$ , Вт/К

\* конструктивне рішення запропоноване в додатку Г складається з стін з основою з металевого профілю, що зовсім не відповідає розглянутим конструкціям об'єктів моделювання

\*\* точковий коефіцієнт теплопровідного включення прийнятий у відповідності до Додатку Д ДСТУ 9191

#### 4.1.1 Енергетичне моделювання будівлі навчального закладу

Для цілей енергетичного моделювання геометрія будівлі була відтворена на основі інформації з технічного паспорта об'єкту. Візуалізацію моделі, створеної в середовищі DesignBuilder, представлено на рисунках 4.2–4.3.

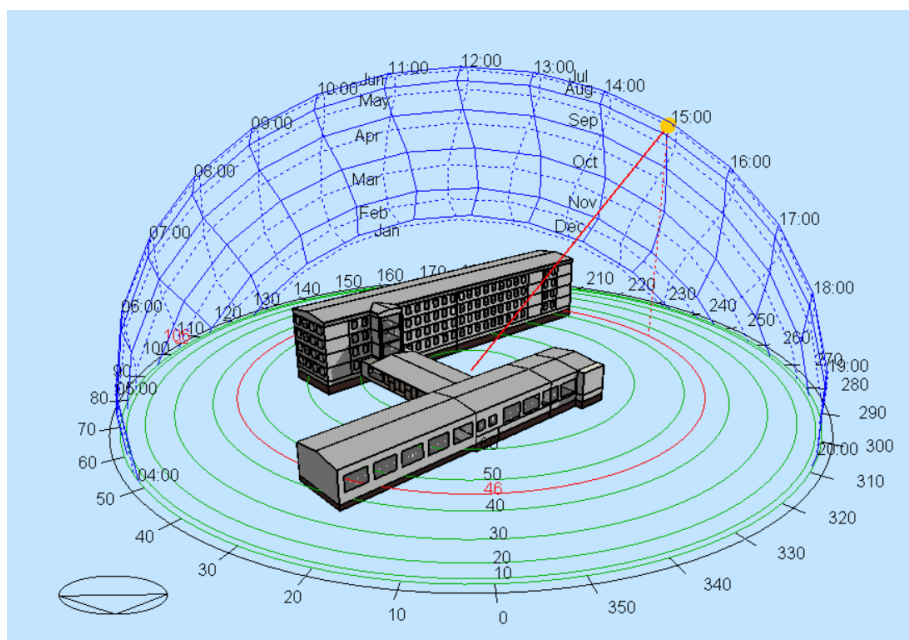


Рисунок 4.2 – Модель досліджуваної будівлі школи у DesignBuilder

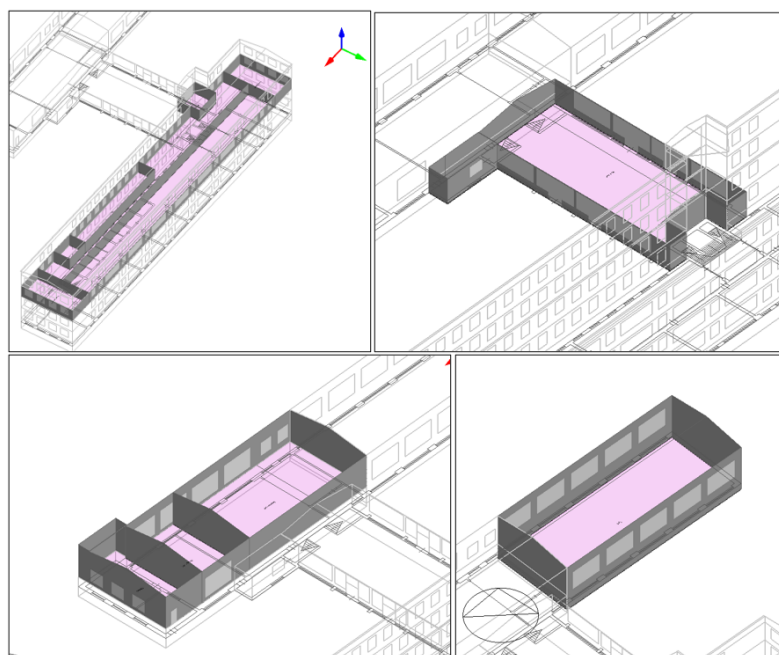


Рисунок 4.3 – Приклад зонування моделі будівлі школи у DesignBuilder



Енергетична модель будівлі школи була верифікована шляхом порівняння результатів енергоспоживання з фактичними даними енергоспоживання будівлі у дослідженнях [50, 71]. Загальний опис характеристик будівлі начального закладу (школи) наведено раніше в пункті 2.1.1. Детальні величини характеристик фактичних огорожувальних конструкцій наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Характеристики огорожувальних конструкцій будівлі школи (фактичний стан)

Тип ОК	Матеріал	$\delta$ , м	$\lambda$ , Вт/ (м·К)	$R_0$ , м <sup>2</sup> ·К/В т	$U_0$ , Вт/м <sup>2</sup> · К	Площа, м <sup>2</sup>
1	2	3	4	7	8	9
Зовнішня стіна	Розчин ц/п	0,03	0,93	1,150*	0,868	3069,4
	Цегла керамічна пустотіла. на ц/п	0,5/0, 613	0,58			
Перекриття неопалювального горища	Залізобетон	0,22	2,04	1,410	0,709	978,9
	Гравій керамзитовий	0,15	0,14			
	Розчин ц/п	0,025	0,81			
Суміщене покриття	Залізобетон	0,22	2,04	0,432	2,315	1117,2
	Розчин ц/ш	0,05	0,64			
	Розчин ц/п	0,05	0,81			
	Руберойд	0,007	0,17			
Перекриття неопалювальног о підвалу	Залізобетон	0,22	2,04	0,760	1,314	396,2
	Розчин ц/п	0,05	0,81			
	Керамзитобетон	0,1	0,41			
	Паркет	0,015	0,23			
Світлопрозорі конструкції	Металопластик, дерево, склоблоки	-	-	0,350*	2,857	1089,4
Вхідні двері	Металеві, дев'яні	-	-	0,470*	2,128	23,0
Опалювальний підвал (стіни)	Секція А	—		2,390	0,419	978,9
Підлога до грунту	Секція В			0,713	1,403	388,3

\*середньозважений за площею показник

В таблиці 4.5 наведено опис прийнятих показників процесів діяльності людей, та інженерних систем будівлі школи які були прийняті при енергетичному моделюванні.

Таблиця 4.5 – Показники процесів діяльності людей та інженерних систем будівлі школи

Показник	Значення
	Застосовано до всіх сценаріїв моделювання
1	2
Щільність заповнення людьми, людей/м <sup>2</sup>	0,095
Фактор приведеної метаболічної активності	0,9 - легка офісна робота
Ізоляція одягу взимку/влітку, clo	1/0,5
Базова температура у будівлі у період роботи, °C	20
Базова температура у будівлі у неробочий час, °C	17
Базова температура режиму охолодження, °C	24
Температура чергового режиму охолодження, °C	27
Питома потужність електрообладнання, Вт/ м <sup>2</sup>	6
Питома потужність системи освітлення, Вт/ м <sup>2</sup>	7
Нормативне споживання гарячої води, л/(м <sup>2</sup> ·день)	0,896
Коефіцієнт сезонної ефективності системи ГВП	0,85
Нормативна кратність повітрообміну системи механічної вентиляції, год <sup>-1</sup>	1,5
Коефіцієнт сезонної ефективності системи опалення	0,85
Коефіцієнт сезонної ефективності системи охолодження	2,25
Коефіцієнт ефективності рекуперації явної (sensible) теплоти	0,65 (окрім базового сценарію)

У процесі дослідження було проведено розрахунок приведених опорів теплопередачі окремих огорожувальних конструкцій будівлі відповідно до семи сценаріїв, що відображають різний рівень урахування теплопровідних включень. Як показано в таблиці 4.6, для кожного типу конструкції (зовнішні стіни, перекриття, вікна тощо) визначено значення приведенного опору теплопередачі  $U_{пр}$ , які враховують або ігнорують вплив теплових містків.

- **Базовий без ТВ:** в цьому варіанті тепла оболонка відображає фактичний стан незадовільної теплоізоляції, теплопровідні включення не враховуються, а опір теплопередачі визначається для плоскої однорідної ділянки огорожувальної конструкції. Властивості фактичних ОК були зазначені в таблиці 4.4.
- **Запропонований без ТВ:** модифікована тепла оболонка з опором теплопередачі по основному полю ОК що відповідає мінімальним вимогам [10]. Без урахування теплопровідних включень.
- **Запропонований  $\Delta U_{tb}$ :** перший сценарій з урахуванням впливу теплопровідних включень через додавання коригувальної поправки – 0.10 Вт/м<sup>2</sup>·К [8] до основних ОК будівлі (зовнішні стіни, дах, підлога). Цей метод може бути використаний за відсутності або недостатній кількості інформації про теплопровідні включення.
- **Запропонований  $\Psi, \chi$  – ДСТУ 9191:** враховуються лінійні та точкові коефіцієнти теплопередачі (таблиця 4.3) згідно додатків Г та Д [15]. Недоліком використання цих лінійних коефіцієнтів теплопередачі є їх значне обмеження охоплення типових конструктивних рішень. Так, для вузла примикання плити перекриття підлоги над неопалюваним підвалом до стіни цоколя, не було підібрано відповідний коефіцієнт через те, що запропонована у стандарті конструкція складається з зовнішніх стін з металевим профілем і жодним чином не підходить для порівняння в досліджуваних нами типах будівель, які складаються з цегли. А вузол примикання горищного перекриття

до зовнішніх стін взагалі не представлений у додатку Г. Для цих компонентів було застосовано коригувальний коефіцієнт з попереднього сценарію.

- **Запропонований  $\Psi, \chi$  – ДСТУ 9191 і деталізоване вікно:** всі розраховані коефіцієнти теплопередачі залишаються чинними і для цього сценарію, проте виконується більш реалістичніше моделювання тепловтрати через вікно, враховуючи підвищену теплопровідність на стику скла з рамкою. В програмному середовищі DesignBuilder було враховано характеристики окремо рами (UPVC) товщиною 6 см з  $U=3,476$  Вт/м<sup>2</sup>·К та  $U=1,000$  Вт/м<sup>2</sup>·К для склопакету. А відношення теплопровідності краю склопакету до його центральної зони склало 1,2.
- **Запропонований  $\Psi, \chi$  – ISO 10211:** найбільш деталізований сценарій, що базується на вимогах міжнародного стандарту ISO 10211. Передбачає детальне чисельне моделювання теплопровідних включень із урахуванням геометрії вузлів, матеріалів і температурних полів (розділ 3 даного дослідження).
- **Запропонований  $\Psi, \chi$  – ISO 10211, nZEB рівень:** збережені підходи з попереднього сценарію, проте рівень ізоляції ОК підвищений до вимог будівель з близьким до нульового енергоспоживання: 200 мм утеплювача зовнішніх стін, 300 мм для неопалювальних горищ, 400 мм для суміщеного перекриття та 100 мм для підлоги по ґрунту. Також коефіцієнт теплопередачі світлопрозорих конструкцій підвищено до 0,9 Вт/м<sup>2</sup>·К.

Обраховані коефіцієнти теплопередачі для всіх вищенаведених сценаріїв було узагальнено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.5 – Коефіцієнти теплопередачі ОК для сценаріїв енергетичного моделювання будівлі школи

Сценарій	Базовий без ТВ	Запропонований без ТВ	Запропонований $\Delta U_{tb}$	Запропонований $\Psi, \chi$ – ДСТУ 9191	Запропонований $\Psi, \chi$ – ДСТУ 9191 і деталізоване вікно	Запропонований $\Psi, \chi$ – ISO 10211	Запропонований $\Psi, \chi$ – ISO 10211, nZEB рівень
Тип ОК	$U_{op}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$	$U_{op}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$	$U_{op} + \Delta U_{tb}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$	$U_{пр}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$	$U_{пр}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$	$U_{пр}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$	$U_{пр}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$
Зовнішні стіни	0,868	0,250	0,350	0,379	0,379	0,390	0,269
Стіни опалювального підвалу	0,419	0,289	0,289	0,289	0,289	0,289	0,289
Перекриття неопалювального горища	0,709	0,167	0,267	0,267	0,267	0,267	0,267
Суміщене перекриття	2,315	0,143	0,243	0,174	0,174	0,187	0,155
Перекриття неопалювального підвалу	1,314	0,200	0,300	0,300	0,300	0,257	0,228
Світлопрозорі конструкції	2,857	1,111	1,111	1,111	3,476 (UPVC рама) 1,000 (склопакет)	1,111	0,900
Вхідні двері	2,128	1,111	1,111	1,111	1,111	1,111	0,900
Підлога до ґрунту	1,403	0,369	0,469	0,533	0,533	0,405	0,404

Отримані результати симуляції річного рівня енергетичної потреби на опалення та охолодження для базового сценарію зображені на рисунку 4.4.

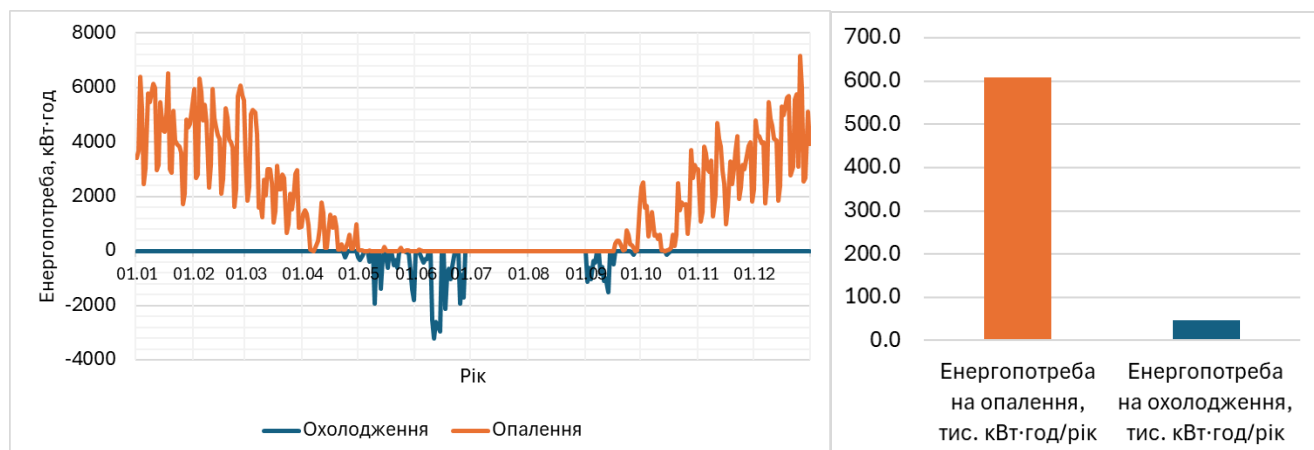


Рисунок 4.4 – Енергопотребa на опалення та охолодження для базового сценарію

З отриманих результатів видно, що опалювальне навантаження має вирішальний вплив на енергоефективність будівлі. У базовому сценарії енергопотребa будівлі істотно зумовлена значними тепловтратами через огорожувальні конструкції, що вказує на потенціал для зменшення споживання енергії шляхом оптимізації теплоізоляції та зменшення впливу теплопровідних включень. В таблиці 4.6 та на рисунку 4.5 зведено результати моделювання річного рівня енергопотреби для інших запропонованих сценаріїв.

Таблиця 4.6 – Результати моделювання енергопотреби на опалення та охолодження для будівлі школи

	Енергопотребa на опалення, тис. кВт·год/рік	Енергопотребa на охолодження, тис. кВт·год/рік
Запропонований; без ТВ	113,6	88,5
Запропонований; $\Delta U_{tb}$	141,2	79,1
Запропонований; $\Psi, \chi$ – ДСТУ 9191	136,1	78,1
Запропонований; $\Psi, \chi$ – ДСТУ 9191 і деталізоване вікно	140,0	66,6
Запропонований; $\Psi, \chi$ – ISO 10211	143,1	79,9
Запропонований; $\Psi, \chi$ – ISO 10211, nZEB рівень	110,4	89,6

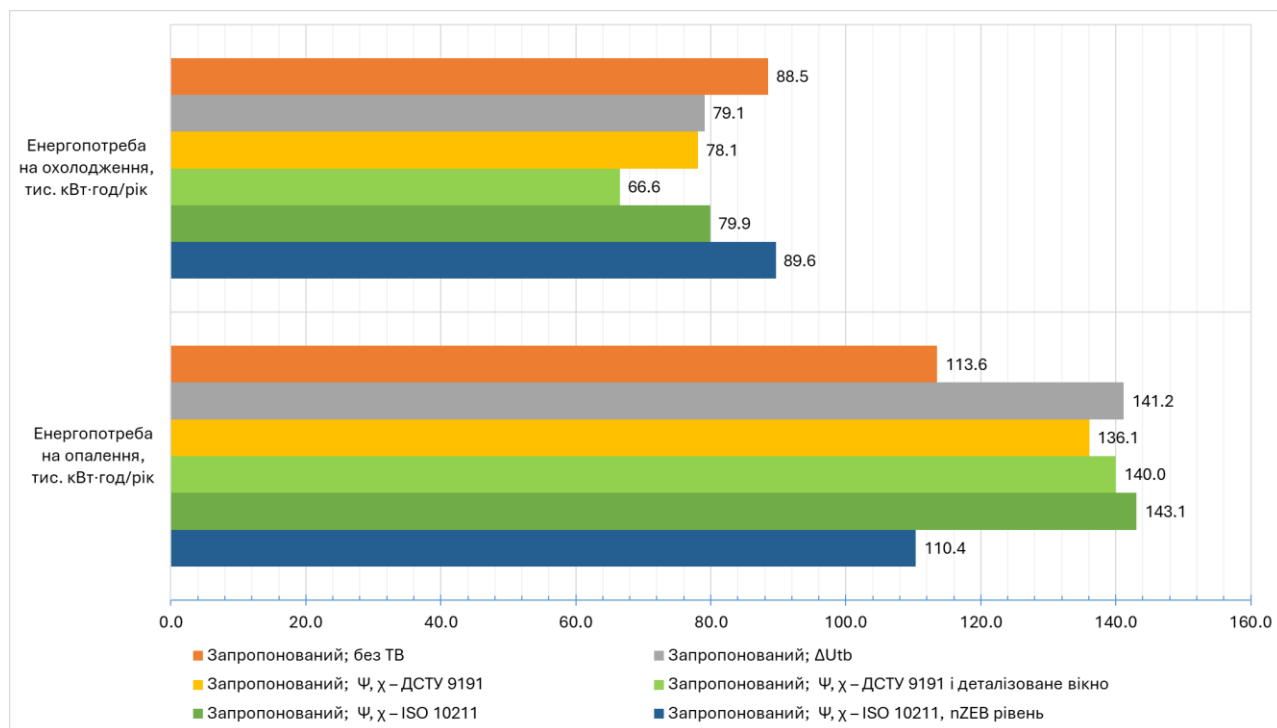


Рисунок 4.5 – Результати моделювання енергопотреб на опалення та охолодження для будівлі школи

На основі графіка та таблиці з результатами розрахунків енергопотреб на опалення та охолодження для різних сценаріїв теплової оболонки будівлі школи, чітко видно, що найвищий показник енергопотреб зафіксовано для сценарію " $\Psi, \chi$  – ISO 10211" — 143,1 тис. кВт·год/рік. Це зумовлено детальним аналізом теплопровідних включень та їх великою кількістю. Різниця для опалення з запропонованим сценарієм без ТВ становить 25,3%, що свідчить про суттєвий вплив теплопровідних включень на показники енергетичної ефективності будівель. Найнижчий показник — 110,4 тис. кВт·год/рік — у сценарії " $\Psi, \chi$  – ISO 10211, nZEB рівень". Це на 2,8% менше за показник запропонованої оболонки відповідної мінімальним вимогам [10], де ТВ не враховувались. Тобто покращення теплової оболонки до вимог nZEB та оптимізація конструктивних вузлів ОК вирішальним образом сприяє зменшенню тепловтрат будівлі.

Аналізуючи енергопотребу на охолодження видно, що найвище навантаження демонструє сценарій (nZEB) рівня — 89,6 тис. кВт·год/рік, а найнижче — 66,6 тис. кВт·год/рік сценарій ( $\Psi, \chi$  – ДСТУ 9191 і деталізоване вікно). Різниця цими сценаріями становить 25,7%. Причиною цьому є те, що надлишкова ізоляція

спричиняє перегрівання приміщень у літній період. Тобто важливо враховувати баланс між опаленням і охолодженням, щоб не допустити надмірного зростання охолоджувальних навантажень.

З точки зору сукупної енергопотреби (опалення + охолодження), очевидно, що найбільш енергоефективним варіантом також є сценарій " $\Psi, \chi$  – ISO 10211, nZEB рівень", який забезпечує загальне навантаження 200,0 тис. кВт·год/рік. Сценарій з використанням коригувального фактору демонструє більший показник енергопотреби на опалення, ніж розрахунок з використанням каталожних показників з ДСТУ-9191, що свідчить про недоцільність його використання у випадках, коли необхідна більш точна оцінка рівня енергоефективності. Впровадження стандартів ISO 10211 та концепції nZEB у проектуванні огорожувальних конструкцій дозволяє досягти суттєвого зниження енергопотреби, особливо в опалювальний період.

На рисунку 4.6 зображено результати розподілу оперативної температури (включає в себе температуру повітря в приміщенні та радіаційну температуру) впродовж року для сценаріїв  $\Psi, \chi$  – ISO 10211.

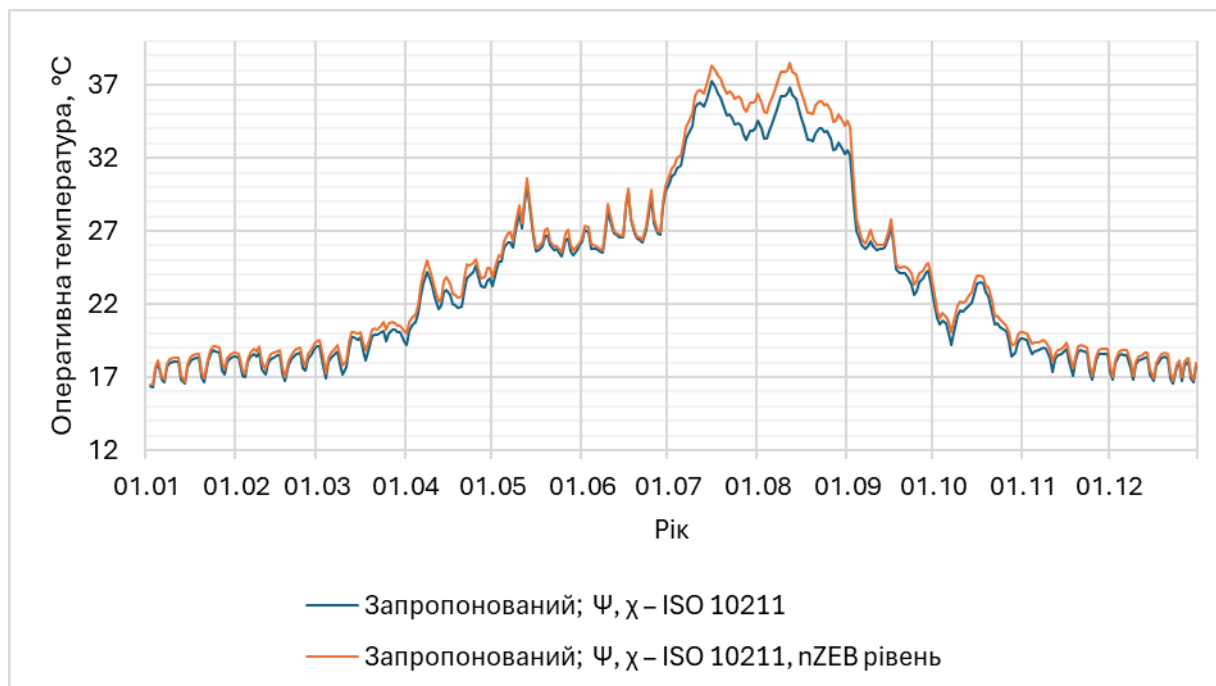


Рисунок 4.6 – Розподіл оперативних температур у приміщеннях будівлі школи



Як видно з рисунку, в зимовий період (01.01 – 01.03; 01.11 – 31.12) обидва сценарії демонструють плавне підвищення температури в денний час з добовими коливаннями. Температура у варіанті nZEB є стабільно вищою на  $\approx 0,2^{\circ}\text{C}$ , що вказує на покращену теплоізоляцію та зменшення втрат через теплопровідні включення. Період весна–літо (01.04 – 01.09) характеризується стрімким зростанням показнику оперативної температури з квітня і максимальних пікових значень у липні–серпні ( $\approx 37^{\circ}\text{C}$ ), що пов'язано з тим що школа перебуває на канікулах і нормативний режим теплового комфорту не підтримується. Осінню (01.09 – 01.11) температура поступово знижується до базових зимових рівнів. Загалом, оперативна температура в nZEB-сценарії свідчить про вищу інерційність і якіснішу теплозахисну оболонку, проте вимагає ретельного підходу до літнього комфорту.

#### 4.1.2 Енергетичне моделювання будівлі багатоквартирного житлового будинку

Для цілей енергетичного моделювання геометрія будівлі була відтворена на основі інформації з альбому технічних рішень [72]. Візуалізацію моделі, створеної в середовищі DesignBuilder, представлено на рисунках 4.7–4.8.

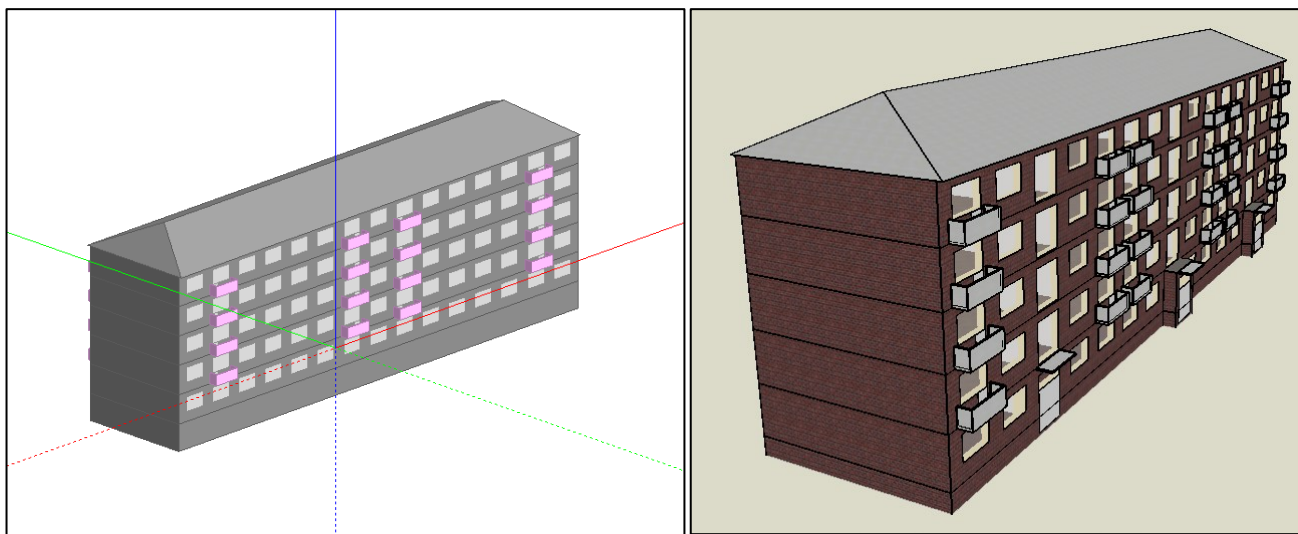


Рисунок 4.7 – Модель досліджуваної будівлі житлового будинку у DesignBuilder

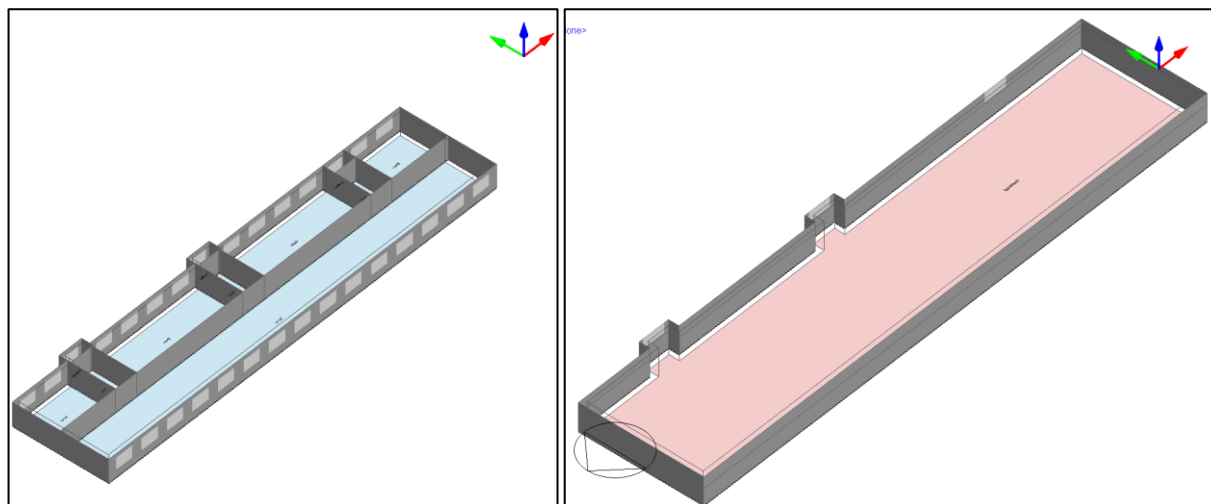


Рисунок 4.8 – Приклад зонування моделі будівлі багатоквартирного будинку у DesignBuilder

Загальний опис характеристик будівлі багатоквартирного будинку наведено раніше в пункті 2.1.2. Детальні величини характеристик фактичних огорожувальних конструкцій наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Характеристики огорожувальних конструкцій будівлі багатоквартирного будинку (фактичний стан)

Тип ОК	Матеріал	$\delta$ , м	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$R_0$ , м <sup>2</sup> ·К/Вт	$U_0$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К	Площа, м <sup>2</sup>
1	2	3	4	7	8	9
Зовнішня стіна	Розчин ц/п	0,02	0,93	0,911	1,098	1085,4
	Цегла керамічна пориста, на ц/п	0,380	0,52			
Перекриття неопалювального горища	Залізобетон	0,22	2,04	1,143	0,875	474,3
	Гравій керамзитовий	0,10	0,14			
	Розчин ц/п	0,5	0,81			
Перекриття неопалювального підвалу	Залізобетон	0,22	2,04	0,395	2,532	474,3
	Розчин ц/п	0,015	0,93			
	Плити керамічні для підлоги	0,02	1,10			
Світлопрозорі конструкції (вікна та двері)	Металопластик, дерево, склоблоки	-	-	0,518*	1,930	466,8

\*середньозважений за площею показник

В таблиці 4.8 наведено опис прийнятих показників процесів діяльності людей, та інженерних систем будівлі багатоповерхового будинку, які були прийняті при енергетичному моделюванні.

Таблиця 4.8 – Показники процесів діяльності людей та інженерних систем будівлі багатоповерхового будинку

Показник	Значення
Застосовано до всіх сценаріїв моделювання	
Щільність заповнення людьми, людей/м <sup>2</sup>	0,023
Ізоляція одягу взимку/влітку, сло	1/0,5
Базова температура у будівлі у період роботи, °C	20
Базова температура у будівлі у неробочий час, °C	17
Базова температура режиму охолодження, °C	26
Температура чергового режиму охолодження, °C	26
Питома потужність електрообладнання, Вт/ м <sup>2</sup>	2
Питома потужність системи освітлення, Вт/ м <sup>2</sup>	2
Нормативне споживання гарячої води, л/(м <sup>2</sup> ·день)	1,060
Нормативна кратність повітрообміну системи механічної вентиляції, год-1	0,7
Коефіцієнт сезонної ефективності системи опалення	1
Коефіцієнт сезонної ефективності системи охолодження	1

У процесі дослідження використовувався аналогічний підхід до сценаріїв моделювання (таблиця 4.1), як і для будівлі школи. Значення приведенного опору теплопередачі  $U_{пр}$  для кожного типу конструкції (зовнішні стіни, перекриття, вікна тощо) наведено в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Коефіцієнти теплопередачі ОК для сценаріїв енергетичного моделювання будівлі багатоквартирного будинку

Сценарій	Базовий без ТВ	Запропонований без ТВ	Запропонований $\Delta U_{tb}$	Запропонований $\Psi, \chi$ – ДСТУ 9191	Запропонований $\Psi, \chi$ – ДСТУ 9191 і деталізоване вікно	Запропонований $\Psi, \chi$ – ISO 10211	Запропонований $\Psi, \chi$ – ISO 10211, nZEB рівень
Тип ОК	$U_{op}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К	$U_{op}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К	$U_{op} + \Delta U_{tb}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К	$U_{пр}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К	$U_{пр}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К	$U_{пр}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К	$U_{пр}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К
Зовнішні стіни	1.098	0,250	0,350	0,487	0,487	0,636	0,344
Перекриття неопалювального горища	0,875	0,167	0,267	0,267	0,267	0,267	0,267
Перекриття неопалювального підвалу	2.532	0,200	0,300	0,300	0,300	0,267	0,232
Світлопрозорі конструкції та двері	1.93	1,111	1,111	1,111	3,476 (UPVC рама) 1,000 (склопакет)	1,111	0,900

Отримані результати симуляції річного рівня енергетичної потреби на опалення та охолодження для базового сценарію зображені на рисунку 4.9.

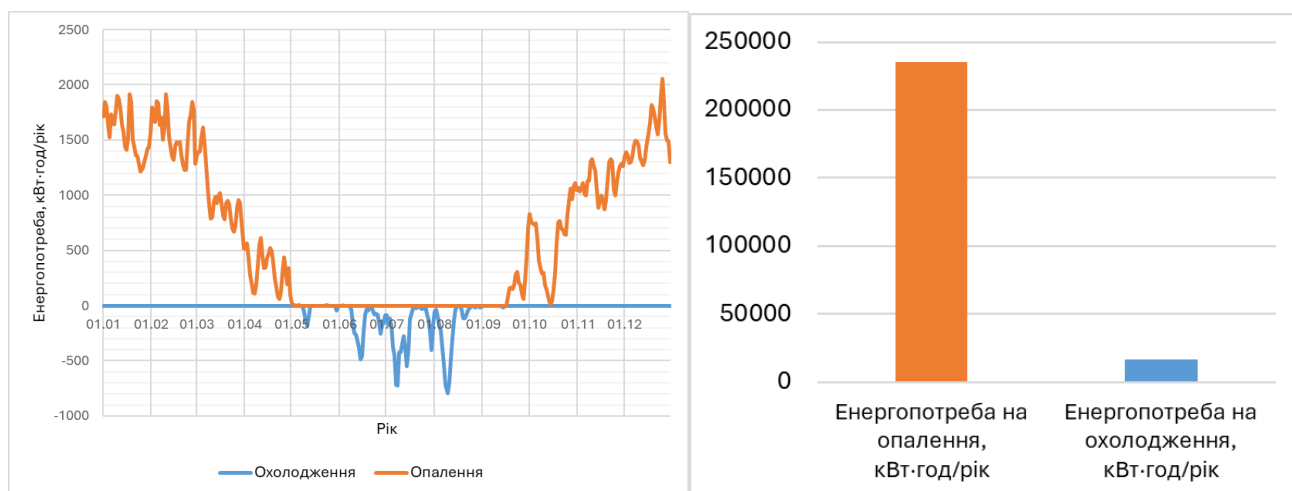


Рисунок 4.9 – Енергопотреба на опалення та охолодження для базового сценарію

З отриманих результатів відслідковується аналогічна до школи, та цілком логічна тенденція рівня співвідношення пікового теплового навантаження на систему опалення в зимові місяці (грудень, січень, лютий), де значення енергопотреби досягає близько 2000 кВт·год/день. Загальна річна потреба в тепловій енергії на опалення становить понад 230 000 кВт·год, що свідчить про високий рівень тепловтрат огорожувальних конструкцій будівлі багатоквартирного житлового будинку. Найбільше навантаження на охолодження припадає на літні місяці (липень та серпень), коли значення коливаються у межах від -500 до -800 кВт·год/день (негативні значення на графіку). Річна енергопотреба на охолодження складає близько 17 000 кВт·год, що суттєво менше порівняно з опаленням (~1:14), що також є характерним для кліматичних умов України, де опалювальний сезон триває довше та має більшу інтенсивність.

З отриманих результатів видно, що опалювальне навантаження має вирішальний вплив на енергоефективність будівлі. У базовому сценарії енергопотреба будівлі істотно зумовлена значними тепловтратами через огорожувальні конструкції, що вказує на потенціал для зменшення споживання енергії шляхом оптимізації теплоізоляції та зменшення впливу теплопровідних

включень. В таблиці 4.10 та на рисунку 4.10 зведено результати моделювання річного рівня енергопотреби для інших запропонованих сценаріїв.

Таблиця 4.10 – Результати моделювання енергопотреби на опалення та охолодження для будівлі багатоквартирного будинку

	Енергопотреба на опалення, тис. кВт·год/рік	Енергопотреба на охолодження, тис. кВт·год/рік
Запропонований; без ТВ	117,2	35,0
Запропонований; $\Delta U_{tb}$	129,4	32,4
Запропонований; $\Psi, \chi$ – ДСТУ 9191	140,1	30,8
Запропонований; $\Psi, \chi$ – ДСТУ 9191 і деталізоване вікно	134,5	35,5
Запропонований; $\Psi, \chi$ – ISO 10211	151,4	29,6
Запропонований; $\Psi, \chi$ – ISO 10211, nZEB рівень	121,3	35,5

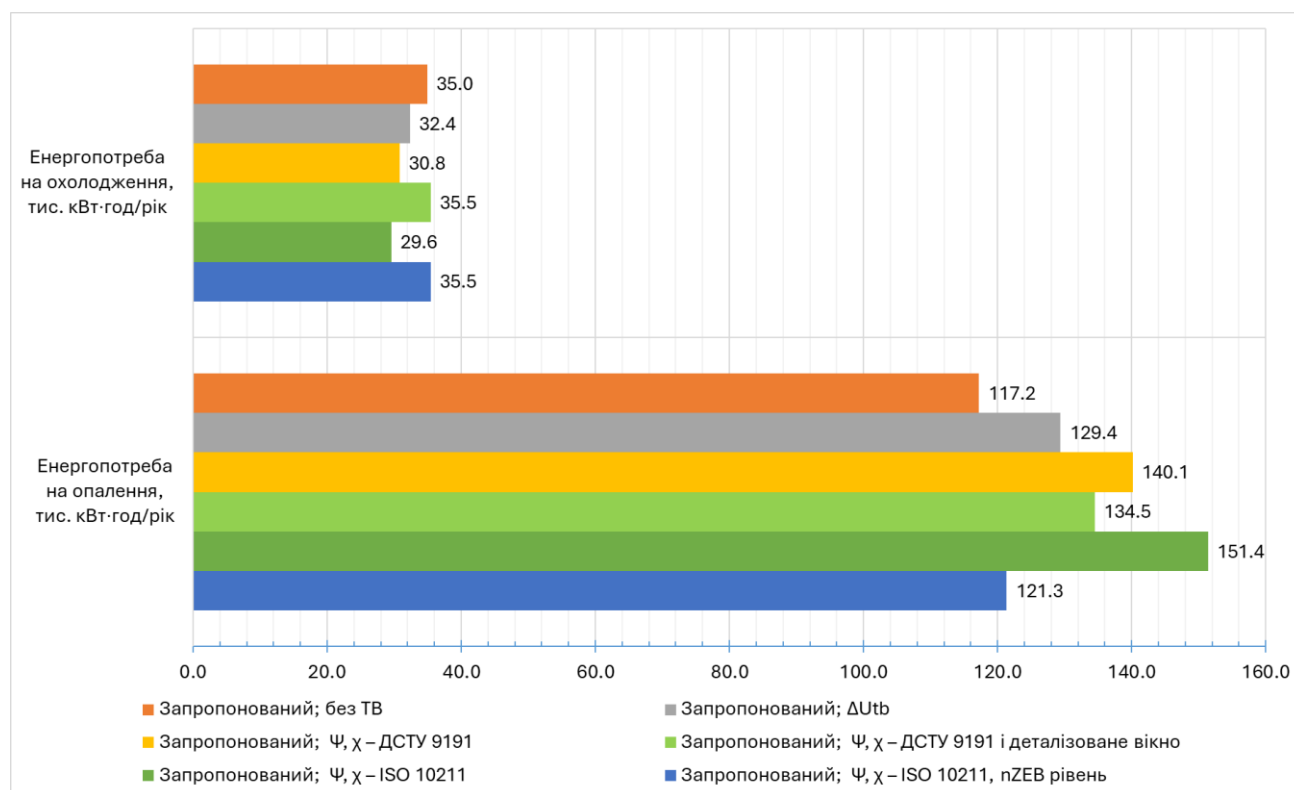


Рисунок 4.10 – Результати моделювання енергопотреби на опалення та охолодження для будівлі багатоквартирного будинку

На основі результатів моделювання, поданих у таблиці 4.10 та на рисунку 4.10, видно, що найменша енергопотреба на потреби опалення, серед сценаріїв з врахуванням теплопровідних включень, спостерігається у випадку " $\Psi, \chi$  – ISO 10211, nZEB рівень" – 121,3 тис. кВт·год/рік. Найбільше значення – 151,4 тис. кВт·год/рік – отримано для сценарію " $\Psi, \chi$  – ISO 10211", що вказує на значний вплив теплових містків на рівень енергопотреби. Так, різниця між даними сценаріями становить суттєвих 24,7%. Сценарії моделювання згідно з ДСТУ9191 (включаючи деталізацію вікна) показують проміжні значення – 134,5–140,1 тис. кВт·год/рік, що також демонструє відчутний вплив теплопровідних включень.

Показники енергопотреби на охолодження менш варіативні, так, найменше значення – 29,6 тис. кВт·год/рік – має сценарій з деталізованим  $\Psi, \chi$  за ISO 10211, що вказує на зниження небажаного перегріву внаслідок загального підвищення коефіцієнту теплопередачі зовнішніх стін приблизно на 30% в порівнянні зі сценарієм використання каталожних даних [15]. Найбільше споживання – 35,5 тис. кВт·год/рік – демонструють запропоновані сценарії без ТВ та nZEB.

Оперативні температури для житлової будівлі зображені на рисунку 4.11.

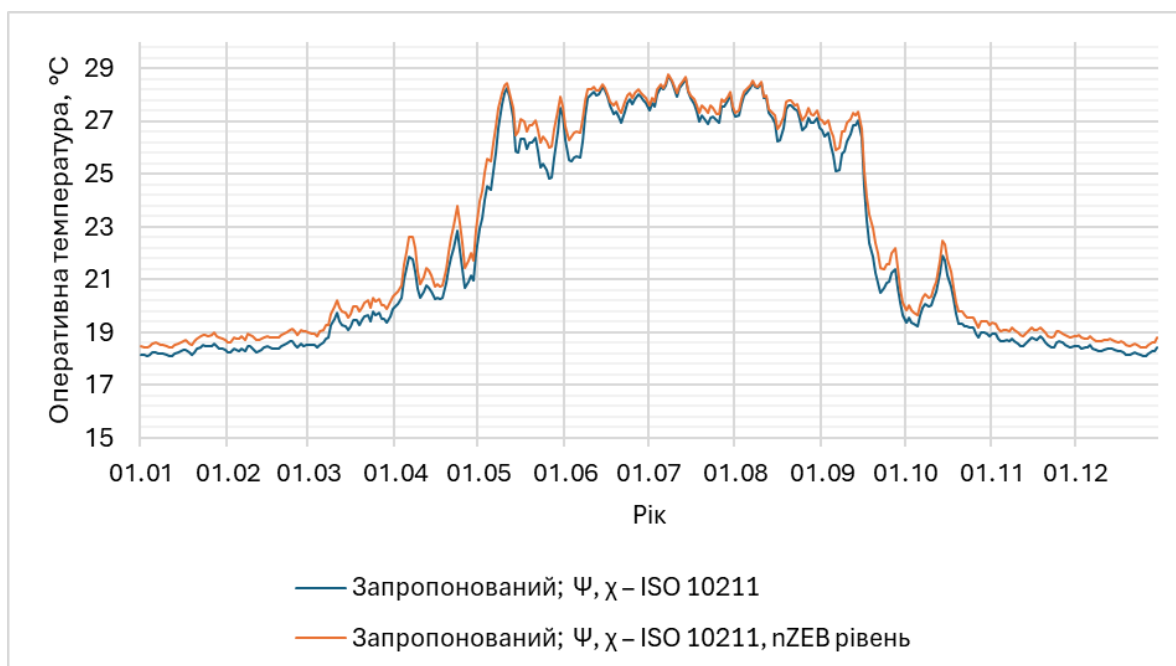


Рисунок 4.11 – Розподіл оперативних температур у приміщеннях будівлі багатоквартирного будинку

Як видно, у сценарії з nZEB-рівнем оперативна температура незначно вища протягом усього року ( $\approx 0,3$ – $0,4$  °C, місцями  $0,6$ – $1,2$  °C), що свідчить про кращу теплозахисну оболонку, яка зменшує втрати тепла та підвищує рівень теплового комфорту у приміщеннях. Зимового періоду (01.01–31.03; 01.11–31.12) температури стабільно тримаються в межах  $17,5$ – $19,5$  °C, з меншими коливаннями в nZEB-сценарії — це важливо для комфорту в умовах мінімального опалення. В період весна–літо (01.04–01.09) у nZEB-варіанті відслідковується дещо швидше підвищення температури навесні, а влітку досягає піків  $\approx 29$  °C. Це може створювати ризики перегріву, особливо за відсутності сонцезахисту чи охолоджувальних систем. Також крива nZEB-сценарію гладкіша, з меншою амплітудою добових коливань, що свідчить про вищу інерційність огорожувальних конструкцій. Тобто, nZEB-рівень забезпечує вищу середньорічну оперативну температуру, що є перевагою в зимовий період, однак може потребувати додаткових заходів з охолодження влітку, що особливо актуально для багатоквартирної будівлі.

#### **Висновки до розділу 4**

У цьому розділі було здійснено комплексне енергетичне моделювання двох типів будівель – навчального закладу та багатоквартирного житлового будинку – з метою кількісного оцінювання впливу теплопровідних включень (ТВ) на річну енергопотребу на опалення та охолодження. Для цього були використані різні сценарії теплової оболонки, що враховували як фактичний стан, так і покращені варіанти, включаючи стандартизовані та детальні розрахунки ТВ відповідно до ДСТУ 9191 і ДСТУ ISO-10211.

Результати моделювання підтверджують критичне значення впливу ТВ на тепловтрати через огорожувальні конструкції. Зокрема, при переході від базового сценарію без ТВ до найбільш детального сценарію з стандартними конструктивними вузлами спостерігається підвищення річної енергопотреби на



опалення та охолодження до 10% у громадській будівлі навчального закладу та до 16% для житлової будівлі. Найгірший показник був зафіксований у сценаріях, що включали лише базові розрахунки ТВ без удосконаленої теплоізоляції, де енергопотреба підвищувалась в середньому на 20–30% вищими. Це демонструє доцільність використання стандарту ISO 10211 у поєднанні з підвищеним рівнем теплоізоляції для проектування сучасних енергоефективних будівель.

Щодо енергопотреби на охолодження, результати показали зворотну тенденцію: у випадку надмірної теплоізоляції спостерігалось незначне підвищення охолоджувального навантаження, що обумовлено зростанням ризику перегріву у літній період. Найнижчий рівень охолоджувального навантаження зафіксовано у сценарії з деталізованим врахуванням втрат через вікна, що вказує на необхідність комплексного підходу до проектування, який включає не лише підвищення опору теплопередачі, а й оптимізацію інсоляції та вентиляції.

Дослідження також підтвердило, що оперативна температура в приміщеннях була більш стабільною і комфортною у сценаріях з покращеним теплозахистом, особливо у зимовий період. При цьому, для багатоквартирних житлових будівель з nZEB-рівнем були виявлені ознаки потенційного перегріву влітку, що вимагає додаткових архітектурних і інженерних рішень (сонцезахист, керована вентиляція).

Таким чином, моделювання підтвердило вадливість глибокого врахування теплопровідних включень при оцінці енергоефективності будівель. Найкращих результатів вдається досягти при аналізі теплопровідних включень відповідно до вимог ДСТУ ISO 10211 і впровадженні принципів nZEB, що дозволяє забезпечити як зниження тепловтрат, так і покращення внутрішнього мікроклімату з урахуванням сезонної варіативності навантажень.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі було проведено комплексне дослідження впливу термічно неоднорідних ділянок (теплопровідних включень) огорожувальних конструкцій на енергетичну ефективність будівель різного призначення за допомогою моделювання теплових потоків та динамічного енергетичного моделювання.

1. Було глибоко проаналізовано теоретичні та методичні підходи до визначення та врахування лінійних та точкових коефіцієнтів теплопровідних включень огорожувальних конструкцій в Україні.

2. Було розроблено та верифіковано теплові моделі типових конструктивних вузлів огорожувальних конструкцій для поточних вимог законодавства до енергетичної ефективності та будівель nZEB. Чисельне моделювання у середовищі THERM дозволило виявити зони найбільших теплових втрат та обґрунтувати доцільність застосування конструктивних покращень, зокрема:

- збільшення товщини теплоізоляції;
- використання виносного монтажу вікон;
- впровадження терморозривів у вузлах;
- оптимізація геометрії з'єднань.

3. Теплопровідні включення чинять суттєвий вплив на загальні тепловтрати будівлі, знижуючи ефективність теплоізоляційних властивостей огорожувальних конструкцій. Покращені вузли, змодельовані за методикою ISO 10211, мають нижчі значення коефіцієнтів теплопередачі, ніж базові вузли. Це свідчить про ефективність запропонованих конструктивних рішень у зниженні тепловтрат. Найбільше зниження значення  $\psi$ -фактора спостерігається для складних конструкційних стиків, де впровадження додаткової теплоізоляції чи терморозривів дало відчутний ефект. Найбільше зниження коефіцієнта теплопередачі досягнуто в вузлах з потенційно найвищими тепловтратами —

балконні плити, парапети, вузли вікон. Так, значення  $\psi$  досягали 0,742 Вт/(м·К) для балконного перекриття, у той час як покращені рішення дозволили знизити цей показник до 0,371 Вт/(м·К), що становить зменшення на 50%. Найбільш суттєвий ефект зменшення впливу теплопровідних включень є рішення з виносним монтажем вікна, так що значення  $\psi$  зменшились приблизно на 80%.

4. Було проведено енергетичне моделювання у DesignBuilder із застосуванням 7 сценаріїв для двох типів будівель (школа та житловий будинок) з метою аналізу показника енергопотреби на опалення та охолодження, на основі якого проводився аналіз впливу теплопровідних включень.

5. Результати моделювання показали що ігнорування теплопровідних включень може призводити до суттєвого зниження енергопотреби у розрахунках, до 30%. У базових сценаріях енергопотреба на опалення була завищена внаслідок непередбачених вузлів. Деталізація теплопровідних включень у nZEB-сценаріях дозволила зменшити річну енергопотребу на опалення на 25–30%.

6. Разом із тим, моделі з високим рівнем теплоізоляції продемонстрували підвищення енергопотреби на охолодження влітку до 25%, що пов'язано з ефектом перегріву. Це підтверджує важливість балансування теплоізоляції із заходами літнього клімат-контролю.

7. Аналіз оперативних температур свідчить, що покращення конструктивних вузлів сприяє стабілізації температури в приміщеннях у зимовий період, проте потребує додаткового регулювання улітку для уникнення перегріву.

8. Отримані результати мають практичне значення для оптимізації проєктних рішень та можуть бути застосовані при сертифікації, термомодернізації, формуванні BIM-моделей та оновленні нормативної бази щодо врахування теплопровідних включень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 р. №2118-VIII. *Голос України*. 2017. 22 липня. (№134).
2. ДСТУ\_Н Б А.2.2.5:2007. Проектування. Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорту будинків при новому будівництві та реконструкції. Уведено вперше; чинний від 2008.07.01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2008. – 44 с.
3. Будівельна кліматологія: ДСТУ-Н Б В.1.1–27:2010. – [Чинні від 2011-11-01] // Мінрегіонбуд України. – К.: Укрархбудінформ, 2011. – 123 с. – (Національний стандарт України).
4. ДСТУ EN ISO 52016-1:2022 Енергоефективність будівель. Енергопотреби для опалення та охолодження, внутрішні температури і навантаження за явною та прихованою теплотою. Частина 1. Методики розрахунку (EN ISO 52016-1:2017, IDT; ISO 52016-1:2017, IDT)
5. ДСТУ CEN ISO/TR 52016-2:2022 Енергоефективність будівель. Енергопотреби для опалення та охолодження, внутрішні температури і навантаження за явною та прихованою теплотою. Частина 2. Пояснення та обґрунтування до стандартів ISO 52016-1 та ISO 52017-1 (CEN ISO/TR 52016-2:2017, IDT; ISO/TR 52016-2:2017, IDT)
6. Про затвердження Мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель: наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 27.10.2020 р. № 260. *Офіційний вісник України*. 2021. № 1. С. 408
7. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель: наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 р. № 169. *Офіційний вісник України*. 2018. № 55. С. 301.
8. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та

гарячого водопостачання. На заміну ДСТУ Б А.2.2-12:2015 ; чинний від 2023-03-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 199 с.

9. Опалення, вентиляція та кондиціювання: ДБН В.2.5-67:2013. – [Чинні від 2014–01–01] // Мінбуд України. – К.: Укрархбудінформ, 2013. – 149 с. – (Державні будівельні норми України).

10. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель: . – [Чинні від 2022–01–09, на заміну ДБН В.2.6–31:2016. ] // Мінрегіон України. – К.: Укрархбудінформ, 2022. –27 с. – (Державні будівельні норми України).

11. European Parliament & Council of the European Union. (2010). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Union, L153, 13–35.

12. European Parliament & Council of the European Union. (2024). Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast). Official Journal of the European Union, L, 2024/1275. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj/eng>

13. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. (2025). Наказ № 38 від 9 лютого 2025 р. «Про затвердження Порядку визначення енергетичної ефективності будівель». Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 19 лютого 2025 р. за № 284/41530. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0284-25#Text>

14. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2022). ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2022 – Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta, GA: ASHRAE.

15. ДСТУ 9191:2022. Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. [Чинний від 2023-03-01]. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2022. – 60 с.

16. ДСТУ ISO 14683:2007. Теплопровідні включення в будівельних конструкціях. Лінійний коефіцієнт теплопередавання. Спрощені методики

розраховування та стандартні значення (ISO 14683:1999, IDT). Чинний від 2009-10-01. Вид. офіц. Київ: ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ, 2007. 20 с.

17. ДСТУ ISO 10211-1:2005. Теплопровідні включення в будівельних конструкціях. Обчислення теплових потоків і поверхневих температур. Частина 1. Загальні методи (ISO 10211-1:1995, IDT). Введено вперше ; чинний від 2008-03-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2007. 38 с

18. ДСТУ ISO 10211-2:2005. Теплопровідні включення в будівельних конструкціях. Обчислення теплових потоків і поверхневих температур. Частина 2. Лінійні теплопровідні включення (ISO 10211-2:1995, IDT). Введено вперше ; чинний від 2008-03-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2007. 20 с.

19. Фаренюк, Г. Г., Фаренюк, Є. Г., Тимофєєв, М. В. Удосконалення методу вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. *Наука та будівництво*. 2024. 3(41), 3–9. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-3-2024-1>

20. Шовкалюк, М. М., Зіменко, С. В. Аналіз тепловтрат через огороження з урахуванням різних методів оцінки теплозахисних властивостей. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2017. (4), 73–83.

21. Дешко В. І., Білоус І. Ю., Крамаренко С. О. Додаткові тепловтрати в місцях примикання віконної рами до огорожувальних конструкцій. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2020. № 2, с. 36–43.

22. Ратушняк, Г. С., Очеретний, А. М., Материнська, О. Ю. Спосіб термомодернізації вузла примикання вікна зовні фасаду будівлі. Патент №139606. Вінниця: ВНТУ

23. Ратушняк, Г. С., & Горюн, О. Ю. Моделювання теплопередачі в вузлі примикання віконного блока до зовнішньої стіни. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2021. (3), 114–118.

24. Боднар Ю.І., Босецький М. В. Вплив теплопровідних включень на енергоефективність зовнішніх стін житлового будинку з монолітним каркасом. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2023. (1), 139-144.

25. Панкевич, О. Д., Миколаєнко, В. В., Панкевич, В. В. Вплив конструктивних рішень вузлових з'єднань (місць примикання конструкцій) на енергоефективність будівлі. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2019. (2), 20–29. Вінницький національний технічний університет.
26. Олексієнко, О. Б. 3D-моделювання точкових теплових містків в системах ETICS з урахуванням європейського досвіду. *Наука та будівництво*. 2023. 2(36), 75
27. Kuusk, K., Kurnitski, J., & Kalamees, T. Calculation and compliance procedures of thermal bridges in energy calculations in various European countries. *Energy Procedia*. 2017. 132, 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.626>
28. Nagy, B., Marosvölgyi, M., & Szalay, Z. Comparison of thermal bridge calculation methods. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2022. 38, 77–83. <https://doi.org/10.14311/APP.2022.38.0077>
29. Ge, H., & Baba, F. Effect of dynamic modeling of thermal bridges on the energy performance of residential buildings with high thermal mass for cold climates. *Sustainable Cities and Society*. 2017. 34, 250–263. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.06.016>
30. Ilomets, S., Kuusk, K., Paap, L., Arumägi, E., & Kalamees, T. Impact of linear thermal bridges on thermal transmittance of renovated apartment buildings. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2017. 23(1), 96–104. <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.976259>
31. Pérez-Carramiñana, C., de la Morena-Marqués, A., González-Avilés, Á. B., Castilla, N., & Galiano-Garrigós, A. Influence of Balcony Thermal Bridges on Energy Efficiency of Dwellings in a Warm Semi-Arid Dry Mediterranean Climate. *Buildings*. 2024. 14(3), 703. <https://doi.org/10.3390/buildings14030703>
32. Šadauskienė, J., Ramanauskas, J., Krawczyk, D. A., Klumbytė, E., & Fokaides, P. A. Investigation of thermal bridges of a new high-performance window installation using 2-D and 3-D methodology. *Buildings*. 2022. 12(5), 572. <https://doi.org/10.3390/buildings12050572>

33. Zhang, X., Jung, G.-J., & Rhee, K.-N. Performance Evaluation of Thermal Bridge Reduction Method for Balcony in Apartment Buildings. *Buildings*. 2022. 12(1), 63. <https://doi.org/10.3390/buildings12010063>
34. Kim, M.-Y., Kim, H.-G., Kim, J.-S., & Hong, G. Investigation of thermal and energy performance of the thermal bridge breaker for reinforced concrete residential buildings. *Energies*. 2022. 15(8), 2854. <https://doi.org/10.3390/en15082854>»
35. Grudzińska, M., Patyna, K., Jabłoński, W., & Brzyski, P. Thermal transmittance in roof–wall structural junction areas insulated with a hemp–lime mixture. *Energies*. 2024. 17(2), 316. <https://doi.org/10.3390/en17020316>
36. 3 поверхи і більше – Типологізація будівель в Україні. Типологізація будівель в Україні – (BTU). URL: <http://building-typology.com.ua/schools/s3-floors-and-more/> (дата звернення: 09.09.2024).
37. Початок та завершення будівництва об'єктів – Державна служба статистики України URL: [https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2020/bud/kzp\\_Ukr/kzp\\_Ukr18-20ue.xlsx](https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2020/bud/kzp_Ukr/kzp_Ukr18-20ue.xlsx) (дата звернення: 09.09.2024).
38. Фонд енергоефективності. (2023). Типові проєктні рішення з термомодернізації будівель. Том 3. Архітектурно-будівельні рішення (АБ). Київ. Режим доступу: <https://eefund.org.ua/wp-content/uploads/2023/09/tom-3.-arhitekturno-budivelni-rishennya-ab-.pdf>
39. Lawrence Berkeley National Laboratory. (n.d.). THERM – Finite Element Model for Building Component Thermal Analysis. Retrieved from <https://windows.lbl.gov/therm-software-downloads>
40. ANSYS Inc. (n.d.). Ansys Fluent: CFD Software for Modeling Fluid Flow and Heat Transfer. Retrieved from <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent#tab1-2>
41. Physibel. (n.d.). Solido – 3D Steady State Heat Transfer Simulation Software. Retrieved from <https://www.physibel.be/en/products/solido>
42. Heat 2 [Електронний ресурс] // Building Physics. – Режим доступу: <https://buildingphysics.com/heat2-3/> – Назва з екрана.



43. Heat 3 [Електронний ресурс] // Building Physics. – Режим доступу: <https://buildingphysics.com/heat3-3/> – Назва з екрана.
44. Flixo Energy [Електронний ресурс] // Flixo – Thermal Bridge Software. – Режим доступу: [flixo.com](https://flixo.com) – Назва з екрана.
45. Baehmann, P. L. Wittchen, S.L., Shephard, M.S., Grice, K.R. and Yerry, M.A. Robust, Geometrically Based, Automatic Two-Dimensional Mesh Generation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1987. 24, 1043 – 1078
46. Finlayson, E., Mitchell, R., Arasteh, D., Huizenga, C., & Curcija, D. THERM 2.0 1998: Опис програми [Електронний ресурс]. – Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory. – Режим доступу: <https://windows.lbl.gov/sites/default/files/Downloads/therm2.pdf>.
47. Shapiro, A. B. 1986. "TOPAZ2D - A Two-Dimensional Finite Element Code for Heat Transfer Analysis, Electrostatic, and Magnetostatic Problems" Lawrence Livermore National Laboratory, Rept. UCID-20824.
48. Shapiro, A. B. 1990. "TOPAZ2D Heat Transfer Code Users Manual and Thermal Property Data Base", Lawrence Livermore National Laboratory, Rept. UCRL-ID-104558, May 1990.
49. Shapiro, A. B., 1983. FACET – A Radiation View Factor Computer Code for Axisymmetric, 2D Planar, and 3D Geometries with Shadowing. Lawrence Livermore National Laboratory, Rept. UCID-19887
50. І. О. Суходуб, П. Ю. Сердечний. Аналіз сценаріїв підвищення рівня енергетичної ефективності громадських будівель з інтеграцією ВДЕ [Текст] *Технології та інжиніринг*. - 2024. - № 2 (19). - С. 44-56.
51. Deshko V.I., Bilous I.Yu., Sukhodub I.O. MATHEMATICAL MODELS FOR DETERMINATION OF SPECIFIC ENERGY NEED FOR HEATING USED IN UKRAINE. *Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES)*. 2018. No.1. Pp. 13-25
52. Аналіз впливу енергоефективних режимів опалення на енергоспоживання будівель на основі математичного моделювання / В. І. Дешко, І.Ю. Білоус, Н.А.

Буяк, О.В. Петрученко // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. – 2020. – № 4 (62). – С. 32-41. – Бібліогр.: 15 назв.

53. Білоус, І., Дешко, В., Буяк, Н. і Сапунов, А. Вплив затінення вікон на енергопотребу та рівень теплового комфорту в літній період для дошкільного навчального закладу. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2024. 59, 4 (Січ 2024). DOI:<https://doi.org/10.15673/ret.v59i4.2734>.

54. The official website DOE-2. Building Energy Use and Cost Analysys Tool [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://doe2.com/DOE2/index.html>.

55. The official website DOE-2. eQUEST the QUick Energy Simulation Tool [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.doe2.com/equest/>

56. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program / D. B. Crawley, L. K. Lawrie [and others] // *Energy and Buildings*. – 2001. – Vol. 33. – P. 319-331.

57. Crawley D. B. EnergyPlus: new capabilities in a whole-building energy simulation program / D. B. Crawley, L. K. Lawrie [and others] // *Seventh International IBPSA Conference* (August 13-15, 2001, Rio de Janeiro).

58. IDA ICE Simulation Software [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.equa.se/en/ida-ice>

59. IES VE Simulation Software [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iesve.com/software/virtual-environment>

60. DesignBuilder Software Package [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://designbuilder.co.uk/software/product-overview>

61. EnergyPlus Development Team. Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations [Електронний ресурс]. – Версія 22.1.0. – U.S. Department of Energy, 2022. – Режим доступу: [https://energyplus.net/assets/nrel\\_custom/pdfs/pdfs\\_v22.1.0/EngineeringReference.pdf](https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v22.1.0/EngineeringReference.pdf) – Назва з екрана.

62. Thermal Bridge Psi-Value Calculator v2.4 [Електронний ресурс] // Phius – Passive House Institute US. – Режим доступу: <https://www.phius.org/thermal-bridge-psi-value-calculator-v24> – Назва з екрана.

63. NeoSklad. Теплоізоляційний профіль високої щільності та пластичності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://neosklad.ua/tproduct/275520861-359492186751-teplozolyatsinii-profl-visoko-schlnost-t> – Назва з екрана.
64. ДСТУ EN ISO 10077-2:2022 Теплотехнічні властивості вікон, дверей і жалюзі. Розрахунок коефіцієнта теплопередачі. Частина 2. Чисельні методи розрахунку для віконних рам (EN ISO 10077-2:2017, IDT; ISO 10077-2:2017, IDT)
65. National Fenestration Rating Council. [Назва документа] [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://nfrccommunity.org/global\\_engine/download.aspx?fileid=8C8CD600-5B5B-4405-8D12-F95EE48B39AA](https://nfrccommunity.org/global_engine/download.aspx?fileid=8C8CD600-5B5B-4405-8D12-F95EE48B39AA) – Назва з екрана.
66. National Fenestration Rating Council. [Назва документа] [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://nfrccommunity.org/global\\_engine/download.aspx?fileid=46BC2B44-990C-4C0D-8ADF-6E4BB6675315](https://nfrccommunity.org/global_engine/download.aspx?fileid=46BC2B44-990C-4C0D-8ADF-6E4BB6675315) – Назва з екрана
67. Білоус, І. Ю. Оцінювання енергоефективності будівлі в умовах динамічної зміни характеристик середовища : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.01 – енергетичні системи та комплекси / Білоус Інна Юріївна. – Київ, 2019. – 236 с.
68. Deshko, V. I., Bilous, I. Y., & Hetmanchuk, H. Розрахунок погодинної природної кратності повітрообміну в багатоповерхових будівлях в умовах мінливості зовнішнього та внутрішнього середовища. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2019. 184, 68-78
69. Дешко, В. І., Білоус, І. Ю., & Гетманчук, Г. О. Бази кліматології для визначення енергетичних характеристик будівель. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. 2017. 4, 67-73.
70. Big Ladder Software. Engineering Reference Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-9/engineering-reference/> – Назва з екрана.
71. Дешко В. І. Використання енергетичного моделювання будівель при розробці проектів з підвищення енергоефективності [Текст] / В. І. Дешко, І. О. Суходуб, П. Ю. Сердечний // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. - 2019. - № 4 (136). - С. 86-96.

## Додаток А

## Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Дешко В. І., Суходуб І. О., Сердечний П. Ю. Використання енергетичного моделювання будівель при розробці проектів з підвищення енергоефективності // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. – 2019. – № 4 (136). – С. 86–96.. <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2019.4.9> (фахове видання)
2. Дешко В. І., Білоус І. Ю., Голубенко О. О., Сердечний П. Ю., Яркова Н. А. Оцінювання енергоефективності школи з врахуванням локальних відновлювальних джерел енергії // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2024. – № 1. – С. 83–98.. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2024.1.08> (фахове видання)
3. І. О. Суходуб, П. Ю. Сердечний. Аналіз сценаріїв підвищення рівня енергетичної ефективності громадських будівель з інтеграцією ВДЕ [Текст] / Технології та інжиніринг. - 2024. - № 2 (19). - С. 44-56. <http://dx.doi.org/10.30857/2786-5371.2024.2.5> (фахове видання)
4. Суходуб І. О., Шкляр В. І., Дубровська В. В., Яценко О. І., Сердечний П. Ю. Оцінка енергетичної ефективності систем теплопостачання житлової будівлі з тепловими насосами на базі комп'ютерного моделювання // Енергетика і автоматика. – 2024. – № 0(1). – С. 142–156. [http://dx.doi.org/10.31548/energiya1\(71\).2024.142](http://dx.doi.org/10.31548/energiya1(71).2024.142) (фахове видання)
5. Суходуб І. О., Сердечний П. Ю. Аналіз впливу термічно неоднорідних огорожувальних конструкцій на енергетичні показники громадської будівлі // Енергетика і автоматика. – 2024. – № 0(4). – С. 156–170. [http://dx.doi.org/10.31548/energiya4\(74\).2024.156](http://dx.doi.org/10.31548/energiya4(74).2024.156) (фахове видання)
6. Сердечний П. Ю. Аналіз систем зеленої сертифікації будівлі з точки зору оцінки енергетичної ефективності // Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина», 7–8 травня 2020 р., м. Київ. –: ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С. 226-234.

7. Сердечний П. Ю. Аналіз впливу термічно неоднорідних огорожувальних конструкцій на енергетичні показники громадської будівлі // Аспірантські читання імені професора Артура Веніаміновича Праховника: збірник тез конференції (Київ, 9–10 квітня 2024 р.). – Київ: ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – С. 31-32.



**Громадська організація  
Асоціація енергетичних аудиторів України**

03179, м. Київ, пр-т. Перемоги 148/1, оф. 257А  
ЄДРПОУ: 39560349  
Тел.: +380 67 4481855, +380 98 006 1123  
E-mail: [vl@aea.org.ua](mailto:vl@aea.org.ua)

**ДОВІДКА**

про впровадження результатів дисертаційної роботи аспіранта  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
**СЕРДЕЧНОГО ПАВЛА ЮРІЙОВИЧА**

Результати дисертаційної роботи аспіранта Сердечного П. Ю. були використані при розробці проектних рішень для нових та реконструйованих будівель, при підготовці методичних матеріалів для енергоаудиту, оцінювання теплотехнічних характеристик будівель, а також при консультуванні фахівців щодо впровадження рішень відповідно до вимог nZEB (будівель з майже нульовим споживанням енергії). У межах дисертаційного дослідження автором проведено моделювання теплового стану типових вузлів термічно неоднорідних огорожувальних конструкцій будівель різного призначення для поточних вимог законодавства до енергетичної ефективності та до рівня будівель nZEB.

Розвинуті у роботі підходи використання динамічних 3D-моделей для детального моделювання енергопотреб на опалення та охолодження з врахуванням різного рівня теплового захисту та теплопровідних включень використовуються також в діяльності Асоціації енергоаудиторів під час підготовки та реалізації проектів з енергоефективності у громадських та житлових будівлях. Запропоновані в дисертаційній роботі рішення розширюють можливості швидкого прийняття обґрунтованих технічних рішень при оцінці рівня енергоефективності будівель та сприяють підвищенню рівня професійної підготовки членів Асоціації.

Даний документ не є підставою для фінансових розрахунків.

З повагою,  
Голова Правління ГО «Асоціація енергетичних аудиторів України»  
Вадим Литвин

