УДК 699.86:624.011.1

Б. А. Глущенко
М. М. Попович

ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ВАРІАНТІВ ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЇ ГОРИЩНОГО ПОКРИТТЯ ГРОМАДСЬКОЇ БУДІВЛІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто інженерну проблему підвищення теплотехнічної ефективності горищного покриття громадських споруд за умов мінімізації постійного статичного тиску на несучі дерев'яні конструкції даху. Шляхом варіантного проєктування та чисельного моделювання температурно-вологісних полів на основі методу скінченних елементів (МСЕ) виконано порівняльну оцінку трьох теплоізоляційних систем для нежитлового холодного горища площею 1720 м². Доведено доцільність застосування комбінованої системи ізоляції (базальтова мінеральна вата разом із фольгованими плитами PIR), яка дозволяє виконати нормативні вимоги ДБН В.2.6-31:2021 (Rq = 6,09 м²·К/Вт), усунути зони внутрішньої конденсації вологи, забезпечити пожежну безпеку та знизити внутрішні напруження у кроквах до безпечного рівня 78% без металевого підсилення.

Ключові слова: *термомодернізація, оптимальні конструктивні рішення, метод скінченних елементів, пінополіізоціанурат (PIR), кроквяна система, енергоефективність, паропроникність.*

Abstract

The paper addresses the engineering problem of enhancing the thermal performance of public building attic roofing while minimizing permanent dead loads on existing load-bearing timber roof structures. Through variant structural design and numerical modeling of two-dimensional temperature and moisture fields using the Finite Element Method (FEM), a comparative evaluation of three thermal insulation systems was performed for an unheated cold attic with a total area of 1,720 m². The expediency of applying a combined hybrid insulation system (basalt mineral wool paired with foil-faced PIR boards) has been proven. The proposed solution meets the stringent energy efficiency requirements of DBN V.2.6-31:2021 (Rq = 6.09 m²·K/W), eliminates internal water vapor condensation zones, complies with fire safety standards for educational institutions, reduces the total roof dead load by 17.55 tons, and lowers bending stresses in existing timber rafters to a safe level of 78% without requiring costly steel reinforcement.

Keywords: *thermal retrofitting, optimal structural solutions, finite element method (FEM), polyisocyanurate (PIR), timber rafter system, energy efficiency, vapor permeability.*

Вступ

Підвищення енергетичної ефективності громадських будівель, зведених у 1960–1980-х роках, є одним із пріоритетних напрямів сучасної будівельної галузі України [1; 2]. Значна частка трансмісійних тепловтрат таких споруд (до 20–25%) припадає на суміщені та горищні покриття, теплозахисні характеристики яких не відповідають чинним нормативним вимогам.

Згідно з ДБН В.2.6-31:2021 [3], для першої температурно-кліматичної зони України мінімально допустиме значення приведеного опору теплопередачі горищних перекриттів нежитлових і навчальних закладів становить $R_{q,min} = 4{,}95$ м²·К/Вт.

У практиці капітального ремонту та термомодернізації досягнення нормативних показників зазвичай реалізується шляхом значного нарощування товщини традиційних волокнистих утеплювачів (мінеральної базальтової вати). Проте укладання шару мінеральної вати товщиною 250 мм і більше разом із необхідними захисними стяжками та мембранами призводить до суттєвого зростання постійного навантаження на існуючі несучі конструкції даху. Дерев'яні кроквяні системи та плити перекриття будівель, що перебувають в експлуатації понад 40–50 років, часто мають ознаки фізичного зносу, біопошкоджень або накопичених прогинів [4]. За таких умов додаткове вагове навантаження може спричинити перевищення граничних напружень і потребуватиме дороговартісного металевого підсилення конструкцій.

Метою роботи є теплотехнічне та статико-конструктивне обґрунтування раціонального варіанта утеплення холодного горища громадської будівлі на основі порівняльного аналізу традиційних волокнистих і сучасних тонкошарових полімерних теплоізоляційних матеріалів.

Результати дослідження

Комплексне дослідження виконано на базі реального об'єкта капітального ремонту — будівлі КЗ «Жмеринський ліцей № 5» (м. Жмеринка, Вінницька область), що має нежитлове холодне горище загальною площею S = 1720 м². Розрахункові параметри мікроклімату та зовнішнього середовища прийнято згідно з ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [5] для умов експлуатації Б: температура внутрішнього повітря навчальних приміщень $t_в$ = +20 °С, відносна вологість $\varphi_в$ = 55%, розрахункова температура зовнішнього повітря найбільш холодної п'ятиденки для Вінницького регіону $t_з$ = −22 °С.

Для багатокритеріальної оптимізації конструктивного рішення сформовано три розрахункові моделі утеплення горищного перекриття з однаковим цільовим рівнем теплового захисту (R_q ≈ 6,1 м²·К/Вт, що на 23% перевищує базовий мінімум ДБН В.2.6-31:2021):

Варіант 1 (базовий проєктний): укладання плит із базальтової мінеральної вати (ρ = 135 кг/м³, розрахунковий коефіцієнт теплопровідності $\lambda_Б$ = 0,041 Вт/(м·К)) загальною товщиною δ = 250 мм у два шари з перекриттям стиків по пароізоляційній плівці та влаштуванням захисної цементно-піщаної стяжки.

Варіант 2 (інноваційний моношаровий): застосування жорстких теплоізоляційних плит із пінополіізоціанурату (PIR) із двостороннім алюмінієвим фольгуванням (ρ = 32 кг/м³, $\lambda_Б$ = 0,022 Вт/(м·К)) товщиною δ = 130 мм.

Варіант 3 (комбінований гібридний): двошарова система, що поєднує нижній шар негорючої базальтової мінеральної вати товщиною δ_1 = 100 мм та верхній шар фольгованих плит PIR товщиною δ_2 = 80 мм (сумарна товщина ізоляції δ = 180 мм).

На першому етапі виконано чисельне моделювання двовимірних стаціонарних температурних полів та процесу дифузії водяної пари методом скінченних елементів (МСЕ) для виявлення потенційних зон конденсації вологи та оцінки температурних градієнтів по товщі огородження (рис. 1).

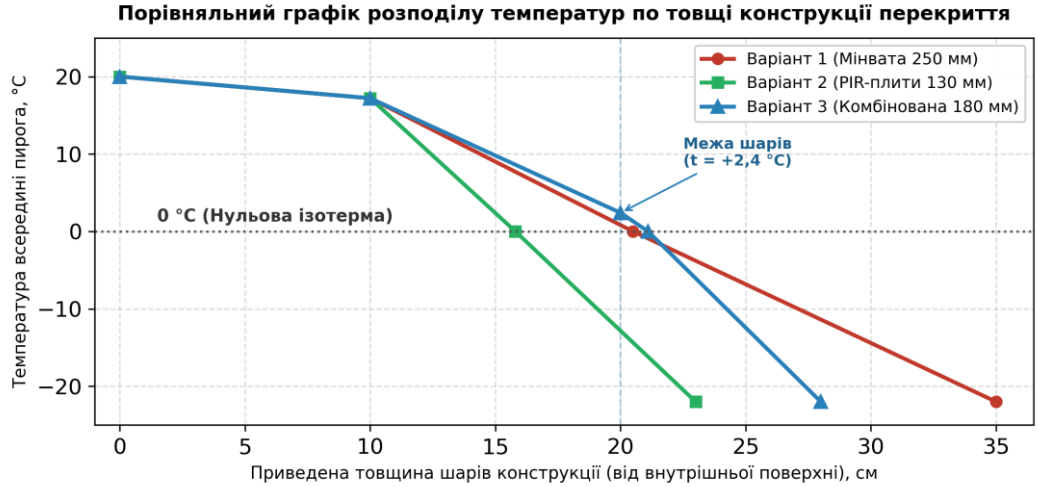


Рисунок 1 – Графік розподілу температурних градієнтів по товщі шарів ізоляції за варіантами моделювання

Результати теплотехнічного моделювання підтвердили, що всі три системи забезпечують високий рівень теплозахисту (R_q = 6,07…6,12 м²·К/Вт). Водночас аналіз вологопереносу виявив принципову відмінність у роботі конструкцій: у Варіанті 1 нульова ізотерма (0 °С) проходить у товщі мінеральної вати на відстані 105 мм від її нижньої грані, що за умови найменшого пошкодження пароізоляції створює ризик накопичення конденсату й зниження теплозахисних властивостей. У Варіантах 2 та 3 наявність герметичного алюмінієвого фольгування на плитах PIR забезпечує високий опір паропроникненню ($R_п$ > 7,5 м²·год·Па/мг). У комбінованому Варіанті 3 температура на межі між мінеральною ватою та плитою PIR становить +2,4 °С (вище точки роси), завдяки чому площина можливої конденсації повністю виноситься за межі волокнистого утеплювача.

На другому етапі проведено пошаровий збір постійних навантажень згідно з ДБН В.1.2-2:2006 [6] та статичний розрахунок існуючих дерев'яних кроквяних ніг перерізом b × h = 75 × 130 мм (деревина сосни 2-го сорту, розрахунковий опір згину $R_и$ = 13,0 МПа відповідно до ДБН В.2.6-161:2017 [4]). Узагальнені результати теплотехнічного, статичного та протипожежного аналізу наведено в таблиці 1 і на рисунку 2.

Таблиця 1 – Порівняльні показники варіантів термомодернізації горищного перекриття (S = 1720 м²)

Показник	Варіант 1 (Мінвата 250 мм)	Варіант 2 (PIR 130 мм)	Варіант 3 (Мінвата 100 мм + PIR 80 мм)
Загальна товщина утеплювача δ, мм	250	130	**180**
Приведений опір теплопередачі Rq, м²·К/Вт	6,12	6,07	**6,09**
Сумарна маса утеплювача на горищі, т	67,68	28,81	**50,13**
Зниження навантаження на конструкції, т (%)	— (базовий)	−38,87 (−57,4%)	**−17,55 (−25,9%)**
Коефіцієнт використання кроків σ / R, %	91%	65%	**78%**
Група горючості нижнього шару (ДБН В.1.1-7)	НГ (негорючий)	Г1 (слабкогорючий)	**НГ (вогнезахисний бар'єр)**

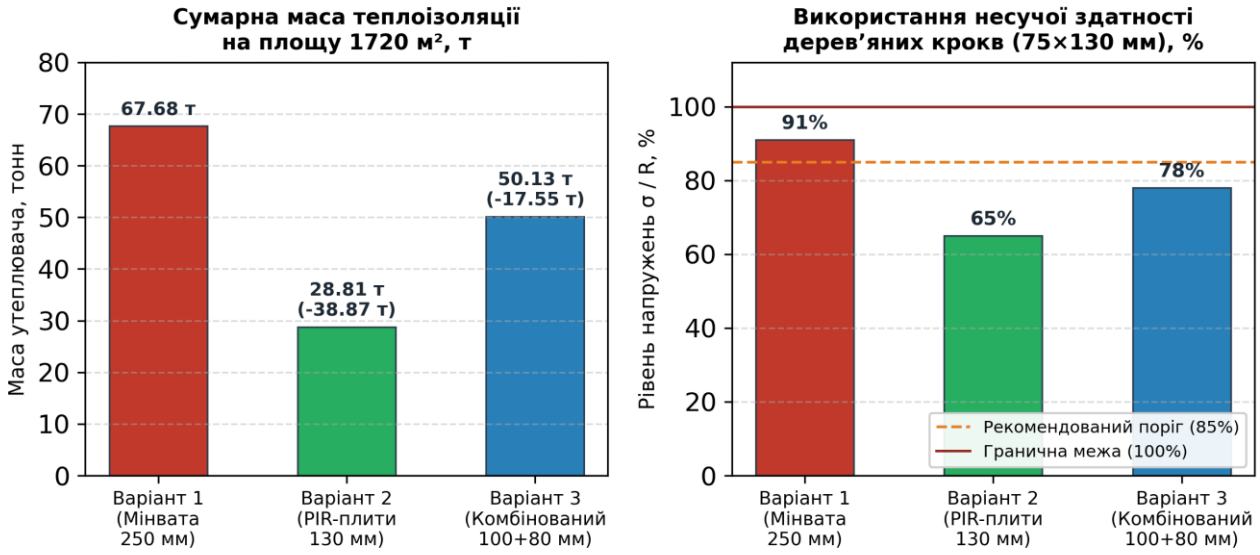


Рисунок 2 – Порівняльний аналіз сумарної ваги теплоізоляції та рівня напружень у дерев'яних кроквах

Як свідчать дані таблиці 1 та рисунка 2, застосування базового Варіанта 1 формує сумарну масу ізоляційного шару 67,68 т, унаслідок чого напруження згину в кроквах досягають 91% від розрахункового опору, що є критичним для експлуатованих дерев'яних елементів. Моношаровий Варіант 2 дозволяє знизити масу утеплювача на 38,87 т (напруження падають до 65%), проте відкрите застосування полімерних плит із групою горючості Г1 над навчальними приміщеннями суперечить вимогам пожежної безпеки ДБН В.1.1-7:2016 [7].

Оптимальним інженерним рішенням визнано гібридний Варіант 3. Нижній шар негорючої базальтової вати (НГ) товщиною 100 мм виконує функцію надійного протипожежного розсікача та акустичного бар'єра з боку навчальних класів ліцею. Верхній шар надлегких фольгованих плит PIR товщиною 80 мм забезпечує основний термічний опір і пароізоляційний захист, зменшуючи загальне вагове навантаження на горище на 17,55 т (на 25,9%). У результаті напруження в дерев'яних кроквах знижуються до стабільного рівня 78%, що гарантує безпечну подальшу експлуатацію даху без проведення капітального підсилення несучих конструкцій.

Висновки

1. Доведено, що при термомодернізації горищних покриттів громадських будівель тривалої експлуатації традиційне збільшення товщини мінераловатного утеплювача до 250 мм створює небезпечне перевантаження існуючих дерев'яних кроквяних систем (використання несучої здатності сягає 91%).

2. На основі чисельного МСЕ-моделювання температурно-вологісного режиму та статичних розрахунків обґрунтовано ефективність комбінованої системи утеплення (100 мм мінеральної вати + 80 мм фольгованих плит PIR), яка забезпечує приведений опір теплопередачі R_q = 6,09 м²·К/Вт та виключає конденсацію вологи в конструкції.

3. Впровадження запропонованого гібридного рішення дозволяє зменшити постійне навантаження на покрівлю площею 1720 м² на 17,55 т, знизити напруження у кроквах до 78% без металевого підсилення та виконати вимоги пожежної безпеки навчальних закладів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Фаренюк Г. Г., Фаренюк Є. Г. Методичні основи нового покоління будівельних норм з енергоефективності будівель. Наука та будівництво. 2022. № 3–4 (33–34). С. 16–25.

2. Мацак Н. Нормативно-правові засади виконання термомодернізаційних робіт у будівництві. Теорія та практика судової експертизи і криміналістики. 2025. Вип. 2 (39). С. 202—216.

3. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Київ : Мінрегіон України, 2022. 23 с.

4. ДБН В.2.6-161:2017. Дерев'яні конструкції. Основні положення. Київ : Мінрегіон України, 2017. 111 с.

5. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с.

6. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проєктування. Київ : Мінбуд України, 2006. 78 с.

7. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. Київ : Мінрегіон України, 2017. 47 с.

Рекомендовано до опублікування Кафедрою промислового та цивільного будівництва

Глущенко Богдан Андрійович **–** магістрант групи Б-25мз, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: bogdan.glushchenko.2017@gmail.com

Попович Микола Миколайович **–** к.т.н., доцент кафедри промислового та цивільного будівництва, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: popovychnick@gmail.com

Bohdan Andriiovych Hlushchenko **–** master's student of group B-25mz, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail : bogdan.glushchenko.2017@gmail.com

Mykola Popovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Industrial and Civil Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: popovychnick@gmail.com