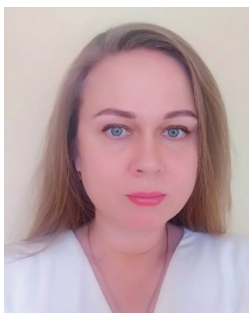




Doi: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2023-8>

УДК 624.04:692.232:697.11:699.86



ОЛЕКСІЄНКО О. Б.

Канд. тех. наук, в.о. завідувача відділу, ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ, Україна,
e-mail: mb-elena@ukr.net,
тел: +38 (066) 938-40-96,
ORCID: 0000-0002-5329-2217

3D-МОДЕЛЮВАННЯ ТОЧКОВИХ ТЕПЛОПРОВІДНИХ ВКЛЮЧЕНЬ У КОМПЛЕКТАХ ФАСАДНОЇ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ (ETICS) З УРАХУВАННЯМ ЄВРОПЕЙСЬКОГО ДОСВІДУ

АНОТАЦІЯ

Теплопровідні включення можуть мати значний вплив на теплові характеристики та енергоефективність будівель. Існує кілька типів теплопровідних включень, які можна позначити як: лінійні теплопровідні включення, кількісно визначені за допомогою лінійного коефіцієнта теплопередачі; і точкові теплопровідні включення, які враховуються за допомогою точкового коефіцієнта теплопередачі. При проектуванні високоенергоефективних будівель із застосуванням комплектів фасадної теплоізоляції (ETICS) оцінка точкових теплопровідних включень є складною та часто ігнорується на практиці. У цій статті аналізуються точкові теплопровідні включення, що виникають внаслідок монтажних кріплень теплоізоляційних шарів до стіни, які використовуються в шарах зовнішніх стін. Представлена спрощена методологія 3D-моделювання для оцінки точкових теплопровідних включень на основі теплових і геометричних властивостей зовнішніх стінових шарів. Точковий коефіцієнт теплопередачі залежить не тільки від теплових властивостей кріпильних матеріалів і розмірів кріпильних елементів, але також і від теплових властивостей матеріалів, які використовуються в шарах зовнішніх стін, і розмірів цих

шарів. Дослідження показало, що найбільший вплив на точковий коефіцієнт теплопропередачі мають конструктивне рішення елементів монтажних кріплень та товщина ізоляційного шару.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ETICS, теплопровідні включення, коефіцієнт теплопередачі, енергоефективність, теплоізоляція.

3D-MODELING OF POINT THERMAL BRIDGES IN EXTERNAL THERMAL INSULATION COMPOSITE SYSTEMS (ETICS) TAKING INTO ACCOUNT THE EUROPEAN EXPERIENCE

ABSTRACT

Thermal bridges significantly influence the thermal performance and energy efficiency of buildings. There are several types of thermal bridges, which can be designated as: - linear thermal bridges, quantified using a linear thermal transmittance; and point thermal bridges, taken into account by means of a point thermal transmittance. When designing buildings with high energy efficiency with ETICS façade insulation systems, the assessment of thermal bridges is complex and often ignored in practice. This article analyzes the point thermal bridges resulting from the mounting fastenings of thermal insulation



layers to the wall used in the layers of external walls. A simplified methodology of 3D simulation is presented for evaluating point thermal bridges based on the thermal and geometric properties of the outer wall layers. The point thermal bridges depend not only on the thermal properties of the fastening materials and the dimensions of the fasteners, but also on the thermal properties of the materials used in the outer wall layers and the dimensions of these layers. The study showed that the design solution of the elements of mounting fasteners and the thickness of the insulation layer have the greatest influence on the point thermal bridges.

KEYWORDS: ETICS, thermal bridges, thermal transmittance, energy efficiency, thermal insulation.

ВСТУП

При проектуванні будівель з високою енергоефективністю необхідно визначити та оцінити фактори, які збільшують втрати енергії будівлею. Одним із таких факторів є теплопровідні вclusions, де опір теплопередачі огорожувальних конструкцій будівлі значно змінюється через повне або часткове проникнення огорожувальних конструкцій будівлі матеріалами з іншою теплопровідністю та/або зміною товщини полотна, та/або різницею між внутрішніми та зовнішніми зонами, наприклад, на стиках стіни/підлоги/стелі [1]. Згідно з оглядом літератури, загальний вплив теплопровідних вclusions на необхідну енергію для опалення є значним і може варіюватися від 5% до 35%. Теодосіу та Пападопулос [2] повідомляють, що більшість будівель частково ізолювані, і що теплопровідні вclusions не враховуються процедурою розрахунку, але фактично втрати тепла у випадках таких будівель до 35% вищі, ніж початково оцінено. Евола [3] виявив, що в умовах м'якого середземноморського клімату корекція теплопровідних вclusions є ефективним заходом для зменшення потреб первинної енергії для опалення, і загальна річна економія енергії становить 8,5%. Фабріціо Асьйон [4] дослідив, що теплопровідні вclusions можуть збільшити потребу в опаленні будівель більш ніж на 20%. Цей вплив залежить від погодних умов [5], рівня ізоляції [6], конструкції теплопровідних вclusions [7-9], типу будівлі (використання та геометрії) та методу, який використовується для реалізації його впливу в межах розрахунку енергетичних потреб будівлі [4]. Підходи до теплопровідних вclusions у регулюванні відрізняються у контексті EPBD (Energy performance of buildings directive – Директива про енергетичну ефективність будівель) [10]. Теплопровідні вclusions можуть впливати на одну точку, лінійну ділянку або просторову конфігурацію. Зазвичай, лінійні теплопровідні вclusions, які виникають у результаті кріплення теплоізоляційного шару до стіни, оцінюються в

розрахунках енергоспоживання будівлі. Існують численні наукові дослідження, у яких лінійні теплопровідні вclusions досліджувалися за допомогою різних методологій обчислення та моделювання, таких як статичні/динамічні та 1D/2D/3D. Гао [11] і Тадеу [12] використали техніку редукції, щоб зменшити складність тривимірної моделі теплопередачі. Фабріціо Асьйон [13,14] використовував 2D та 1D числову модель через порівняння ефектів теплопровідних вclusions між обчисленими та вимірними значеннями.

Лінійні теплопровідні вclusions можна реалізувати шляхом аналізу кожної термограми, що відповідає температурі поверхні об'єкта [16-18]. Франческо Біанчі [19] зазначив, що термографічний аналіз дозволяє ідентифікувати теплопровідні вclusions в огорожувальних конструкціях будівель. Однак, цей метод не вказує значення коефіцієнта теплопередачі.

Більшість досліджень представляють емпіричні залежності лінійних теплопровідних вclusions, з яких можна визначити значення коефіцієнта теплопередачі певних елементів конструкції [7, 20]. На основі цих значень створюється програмне забезпечення чисельного розрахунку та готуються каталоги. Європейський стандарт [21], який містить 76 випадків, що стосуються восьми типів теплопровідних вclusions (дахи, кути, проміжні підлоги, внутрішні стіни, плити на перших підлогах, підвісні підлоги, стовпи, вікна та дверні отвори), є одним з найбільш часто використовуваних каталогів. Однак, у випадку точкових теплопровідних вclusions, їх ефект часто нехтується в аналізах, спрямованих на визначення енергетичної ефективності будівлі [10]. Тим не менш, це важливий фактор при проектуванні будівель з високою енергоефективністю, зокрема, будівель з вентильованими фасадними системами, де профілі теплоізоляційних плит кріпляться безпосередньо до несучого шару стін або використовуються кронштейни з метою зменшення впливу теплопровідних вclusions на властивості теплоізоляції [22]. Дослідження показують, що якщо для кріплення теплоізоляції використовувати суцільні металеві профілі (які пронизують теплоізоляційний шар), опір теплопередачі може бути зменшений вдвічі [23-25]. Якщо цими додатковими втратами тепла, що виникають через точкову теплопередачу, знехтувати або оцінити їх неправильно, розрахунки енергоефективності для будівлі можуть бути неправильними. Таким чином, вибір системи опалення може бути проблематичним, оскільки необхідні температурні умови в приміщенні не будуть забезпечені через велику різницю зовнішніх і внутрішніх температур. Анджеліс і Серра [26] стверджують, що це може бути причиною конденсації вологи та розвитку цвілі в місцях, де є теплопровідні вclusions.

На практиці, щоб дізнатися справжнє зна-



чення точкового теплопровідного включення, необхідно провести чисельне моделювання або експериментальні вимірювання конкретної конструкції. Однак, без спеціального програмного забезпечення на етапі проектування важко оцінити теплопровідне включення [27]. Тому, на етапі проектування важливо застосовувати спрощену методологію оцінки точкової теплопередачі, яка включає теплові та геометричні властивості конструкційних матеріалів.

Феодосіу [31] дійшов такого ж висновку: точкові теплопровідні включення в системах облицювання можуть становити значну частину теплового балансу будівель. Нехтування їх наявністю може призвести до значного зниження фактичних теплових потоків, які можуть складати від 5% до майже 20% загальних теплових потоків крізь огорожувальні конструкції будівлі, залежно, головним чином, від теплопередачі несучої стіни та характеристик теплоізоляційного матеріалу і механічних кріплень. Фабріціо Асьйон [6] виявив, що при збільшенні товщини теплоізоляційного шару U-значення всієї стіни не забезпечить оптимальне значення в деяких випадках, які безпосередньо залежать від кліматичних умов. Крім того, матеріал несучого шару зовнішньої стіни своїми значними теплотехнічними властивостями може відрізнитися від стіни з монолітного бетону, яка має низькі теплотехнічні властивості. При проектуванні будівель з високою енергоефективністю, наприклад, відповідно до стандартів пасивної будівлі, коефіцієнт U для всієї стіни має бути менше 0,15 Вт/(м²·К). Якщо ця вимога не виконується, необхідно компенсувати це збільшенням товщини шару ізоляції. Таким чином, якщо вплив точкових теплопровідних включень не оцінюється, будівлі не можуть досягти високоефективного енергоспоживання на практиці.

У нормативній базі України деякі значення лінійних коефіцієнтів теплопередачі лінійних теплопровідних включень та точкові коефіцієнти теплопередачі точкових теплопровідних включень наведено в ДСТУ 9191:2022 [37].

Цілями даної роботи були: оцінити точкове

теплопровідне включення χ - величини монтажного кріплення, що пронизує теплоізоляцію; і отримати точкову теплопроникність χ -значення, а також розробити спрощену методологію для оцінки точкових теплопровідних включень для високої енергетичної ефективності будівель.

Розглянемо зовнішні теплоізоляційні комплекти ETICS [28, 29], що використовуються для енергетичної модернізації існуючих фасадів будівель та при новому будівництві. Ці комплекти складаються з теплоізоляційного матеріалу, що монтується на фасад будівлі за допомогою клею та механічного кріплення з подальшим нанесенням тонкошарової штукатурки, яка включає армуючу сітку [30, 35, 36].

Існує кілька типів теплопровідних включень [33], які можна позначити як: (1) – лінійні теплопровідні включення (наприклад, вздовж кута стіни або вздовж периметра з'єднання «стіна – вікно» [34]), кількісно визначені за допомогою лінійного коефіцієнта теплопередачі (Ψ); і (2) – точкові теплопровідні включення (наприклад, через механічні сталеві кріплення, що перетинають ізоляційний шар ETICS, які враховуються за допомогою точкового коефіцієнта теплопередачі (χ)).

У цьому дослідженні розглядається лише вищезазначений другий тип теплопровідних включень.

ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Визначення точкових коефіцієнтів теплопередачі комплектів ETICS з використанням двох типів механічних кріплень з замкнутими повітряними прошарками для двох типів утеплювачів різної товщини (100, 150, 200 мм). Механічні кріплення для ETICS до бетонної стіни виготовлені відповідно до EAD 330965-00-0601 [31]. Відповідно до [31], точковий коефіцієнт теплопередачі таких механічних кріплень оцінюється згідно з технічним звітом EOTA TR 025 [32].

ВХІДНІ ДАНІ ТА МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ

Розміри та типи використаних матеріалів були прийняті відповідно до [31]. Заглиблення монтажного кріплення в бетонну стіну становить 25 мм.

Таблиця 1 – Значення теплопровідності матеріалів, використаних у розрахунках

№	Назва матеріалу	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Джерело
1	Мінераловатні плити	0,040	Протоколи випробувань
2	Пінополістирольні плити	0,036	Протоколи випробувань
3	Залізобетон, ($\rho=2400 \text{ кг/м}^3$)	2,0	EN ISO 10456:2007/AC:2009
4	Поліпропілен, армований волокном	0,22	EN ISO 10456:2007/AC:2009
5	Вуглецева сталь (матеріал анкерів)	50	EN ISO 10456:2007/AC:2009

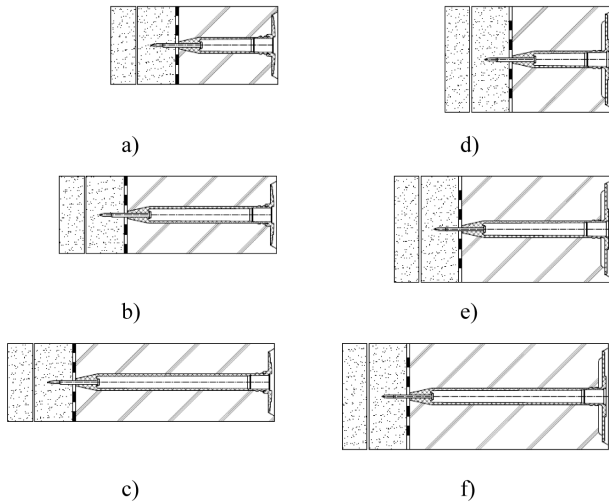


Рисунок 1 – Конструктивні рішення монтажних кріплень:

№ 1 – з теплоізоляцією EPS і MV: а – 100 мм, б – 150 мм, с – 200 мм, і № 2 – з теплоізоляцією EPS і MV: d – 100 мм, е – 150 мм, f – 200 мм.

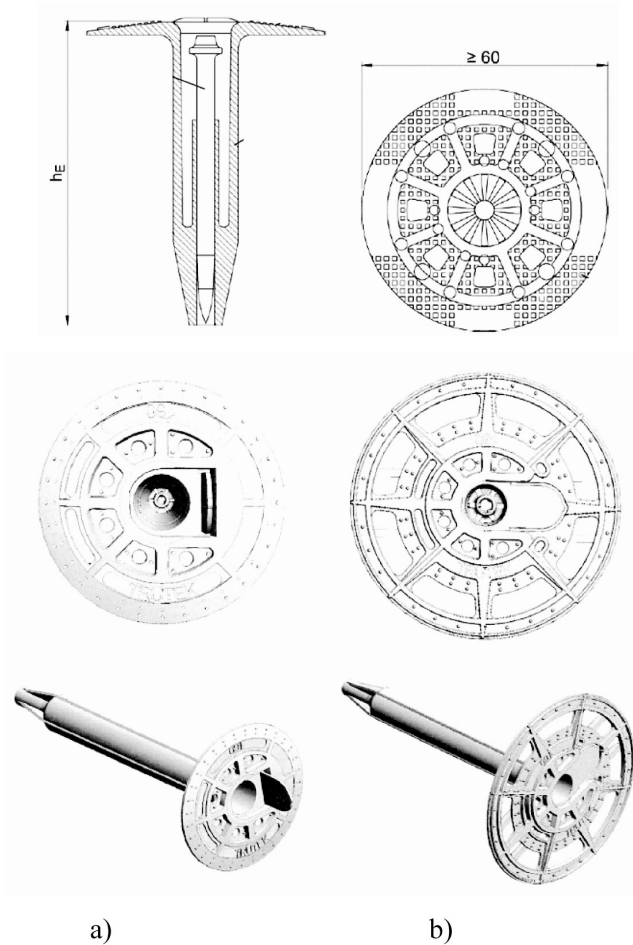


Рисунок 3 – 3D-модель монтажних кріплень:
а) № 1; б) № 2

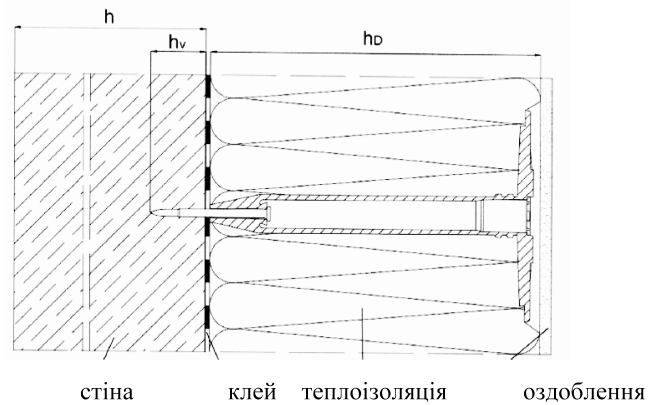


Рисунок 2 – Конструктивне рішення: h – товщина основи, h_d – товщина теплоізоляції, $h_v \geq 20$ мм – глибина занурення в основу

Розглянуто три товщини теплоізоляції (100, 150 і 200 мм), два види монтажних дюбелів з замкненими повітряними прошарками № 1 і № 2 та два види утеплювачів: мінераловатні плити (MW) і пінополістирольні плити (EPS).

Значення теплопровідності матеріалів, використаних у розрахунках, були прийняті відповідно до стандартів EN ISO 10456:2007/AC:2009 та EN ISO 6946:2017 (дані наведені в табл. 1). Розподіл матеріалів у розрахункових моделях для вибраного випадку представлений на рис. 4.

Для кожного монтажного кріплення були виконані розрахунки для трьох різних товщин ізоляції: 100, 150 і 200 мм. Товщина стіни конструкції (основи) становила 100 мм, незалежно від матеріалу стіни.

Розрахунок теплового потоку виконано згідно з EN ISO 10211:2017 на основі результатів розрахунків тривимірних температурних полів за допомогою програмного забезпечення Solido Physibel, що є

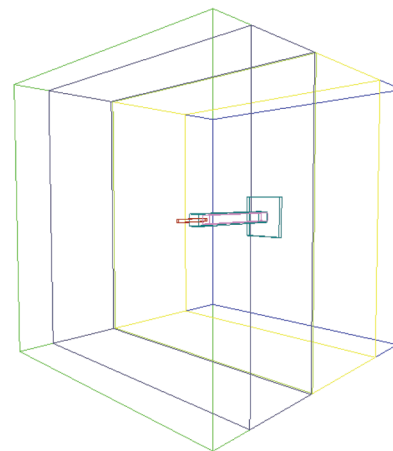


Рисунок 4 – 3D-модель Solido Physibel для розрахунку



ефективним методом розрахунку 3D стаціонарного теплообміну в об'єктах будь-якої форми.

Розрахункові значення температури внутрішнього середовища при моделюванні становить 20°C, значення температури зовнішнього середовища – 0°C.

Конструктивні рішення монтажних кріплень наведено на рис. 1 і 2, 3D- модель монтажних кріплень – на рис. 3.

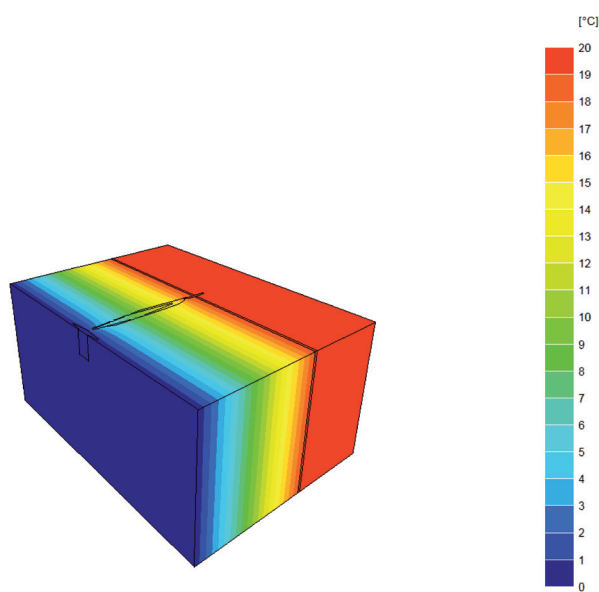


Рисунок 5 – Розрахунок і розподіл температури в стіні і теплоізоляції товщиною 100 мм з монтажним кріпленням № 1 (переріз на місці монтажного кріплення)

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ

3D-модель розрахунку механічних кріплень (виготовлених згідно з EAD 330965-00-0601) в програмному забезпеченні Solido Physibel показано на рис. 4÷6.

Результати розрахунку теплового потоку конструкції з механічним кріпленням і без кріплень та точкових коефіцієнтів теплопередачі наведено в табл. 2.

Розрахунок та моделювання в програмному

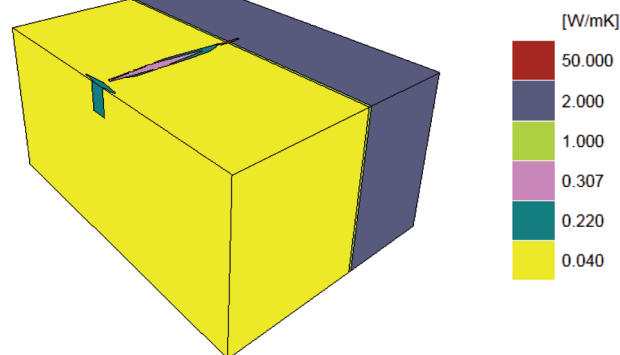


Рисунок 6 – Коефіцієнти теплопровідності в конструкції з теплоізоляцією товщиною 100 мм з монтажним кріпленням № 1 (переріз на місці монтажного кріплення)

Таблиця 2 – Результати розрахунку теплового потоку конструкції з механічним кріпленням і без механічного кріплення та точкових коефіцієнтів теплопередачі

Тип кріплення	Тепловий потік (q1) з кріпленням	Тепловий потік (q1) без кріплення	Різниця температур ΔT	Тип теплоізоляції	Теплопровідність	Товщина теплоізоляції	χ
	Вт	Вт	°C			мм	Вт/К
Кріплення № 1	0,9055	0,8997	20	Пінополістирол (EPS)	0,04	100	0,0003
Кріплення № 2	0,9076	0,8996	20			100	0,0004
Кріплення № 1	0,6216	0,6167	20			150	0,0003
Кріплення № 2	0,6226	0,6167	20			150	0,0003
Кріплення № 1	0,4740	0,4691	20			200	0,0002
Кріплення № 2	0,4747	0,4691	20			200	0,0003
Кріплення № 1	0,8223	0,8165	20	Мінеральна вата (MW)	0,036	100	0,0003
Кріплення № 2	0,8244	0,8166	20			100	0,0004
Кріплення № 1	0,5631	0,5581	20			150	0,0003
Кріплення № 2	0,5641	0,5581	20			150	0,0003
Кріплення № 1	0,4289	0,4240	20			200	0,0002
Кріплення № 2	0,4296	0,4240	20			200	0,0003



забезпеченні Solido Physibel проведено для одного механічного кріплення на площу ETICS 0,36 x 0,36 м.

За допомогою 3D-моделювання програмного забезпечення Solido Physibel визначено точкові теплопровідні включення для комплекту ETICS з товщиною теплоізоляції 100, 150 та 200 мм, для механічних кріплень №№ 1 і 2 і утеплювачів (мінераловатні плити (MW) і пінополістирольні плити (EPS)). З розрахунків видно, що при збільшенні товщини теплоізоляційного шару точковий коефіцієнт теплопередачі зменшується. Тобто, зі збільшенням теплоізоляційного шару вплив точкового теплопровідного включення зменшується.

Згідно з [37], значення точкового коефіцієнта теплопередачі точкових теплопровідних включень у вузлі улаштування пластикового дюбелю з металевим стрижнем для кріплення теплоізоляційного шару в комплекті ETICS при товщині ізоляції 150 мм становить 0,005 Вт/К та у вузлі улаштування пластикового дюбелю з пластиковим стрижнем для кріплення теплоізоляційного шару в комплекті ETICS – 0,0015 Вт/К.

При монтажу кріплень (в середньому 8 шт. на 1 м²) згідно з [37] коефіцієнт теплопровідності цегляної стіни з комплектом ETICS становить $U=0,165$ Вт/м²·К для пластикового дюбелю з металевим стрижнем та $U=0,137$ Вт/м²·К для пластикового кріплення з пластиковим стрижнем, для монтажних кріплень згідно з EAD 330965-00-0601 коефіцієнт теплопровідності залізобетонної стіни з ETICS становить $U=0,127$ Вт/м²·К.

Тобто, як видно з 3D-моделювання, застосування монтажних кріплень згідно з EAD 330965-00-0601 більш енергоефективне (від 8% до 30% в залежності від прийнятого конструктивного рішення).

ВИСНОВКИ

Результати розрахунку точкового коефіцієнта теплопередачі χ показують, що оцінка ефекту теплопровідних включень є дуже важливою для проектування будівель з високою енергоефективністю. Точковий коефіцієнт теплопередачі χ залежить не тільки від теплових властивостей кріпильних матеріалів і розмірів кріпильних елементів, але також від теплових властивостей матеріалів, які використовуються в шарах зовнішніх стін, і розмірів цих шарів.

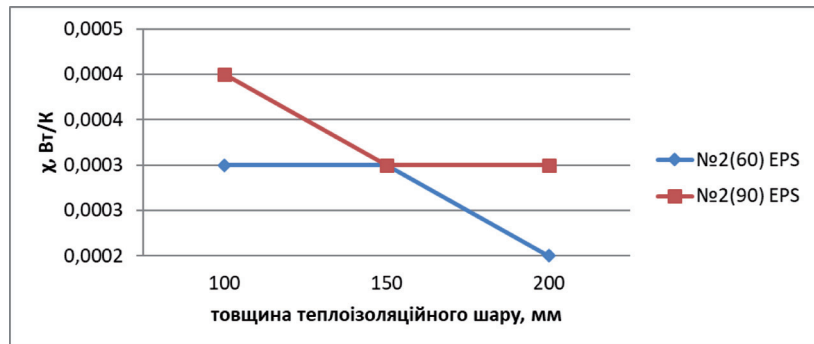


Рисунок 7 – Точковий коефіцієнт теплопередачі для бетонної стіни з комплектом ETICS з теплоізоляційним шаром з EPS

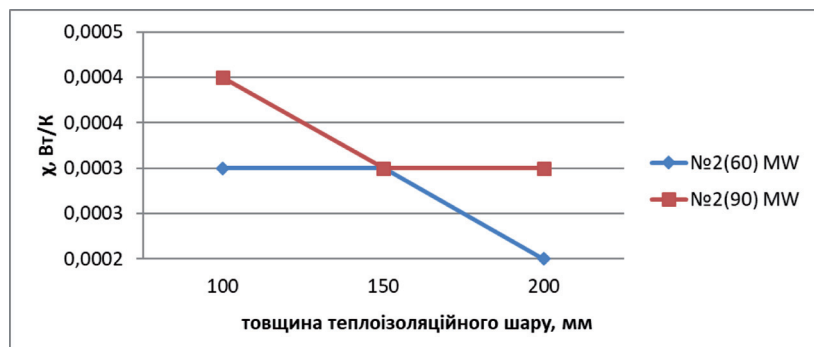


Рисунок 8 – Точковий коефіцієнт теплопередачі для бетонної стіни з комплектом ETICS з теплоізоляційним шаром з MW

Дослідження показало, що найбільший вплив на χ -значення мають конструктивні рішення механічного кріплення та товщина ізоляційного шару.

При аналізі впливу теплових властивостей теплоізоляційного шару помічено, що зі збільшенням товщини теплоізоляційного шару вплив теплопровідного включення зменшується (рис. 7-8).

Точкові теплопровідні включення залежать від різних параметрів зовнішньої стіни (товщини шарів і теплових властивостей матеріалів); якщо оцінити ці відмінності, можна передбачити значення точкового коефіцієнта теплопередачі. Це досягається у випадку, якщо відомі розрахункові значення базового варіанту конструкції та відмінності конструкції зовнішньої стіни від основної.

Дослідження показали, що застосування монтажних кріплень згідно з EAD 330965-00-0601 є більш енергоефективним, а підвищення енергоефективності становить від 8% до 30% в залежності від прийнятого конструктивного рішення.

Це важливо для проектування енергоефективних будівель, оскільки розрахунок точкових



теплопровідних включень є складним, вимагає додаткових знань, спеціального програмного забезпечення та навичок його використання. З цих причин точкові теплопровідні включення на практиці досить часто ігноруються, що може призвести до великих помилок в оцінці будівель з високою енергоефективністю та проектуванні систем опалення та вентиляції.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. The International Organization for Standardization (ISO). Thermal Bridges in Building Construction. Heat Flows and Surface Temperatures. Detailed Calculations; The International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 2007.
2. Theodosiou, T.G.; Papadopoulos, A.M. The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions. *Energy Build.* 2008, 40, 2083–2089.
3. Evola, G.; Margani, G.; Marletta, L. Energy and cost evaluation of thermal bridge correction in Mediterranean climate. *Energy Build.* 2011, 43, 2385–2393.
4. Ascione, F.; Bianco, N.; de Rossi, F.; Turni, G.; Vanoli, G.P. Different methods for the modelling of thermal bridges into energy simulation programs: Comparisons of accuracy for flat heterogeneous roofs in Italian climates. *Appl. Energy* 2012, 97, 405–418.
5. Theodosiou, T.; Tsikaloudaki, K.; Bikas, D.; Aravantinos, D.; Kontoleon, K.N. Assessing the Use of Simplified and Analytical Methods for Approaching Thermal Bridges with Regard to Their Impact on the Thermal Performance of the Building Envelope. Available online: http://wsb14barcelona.org/programme/pdf_poster/P-059.pdf (accessed on 20 October 2015).
6. Ascione, F.; Bianco, N.; de Masi, R.F.; Mauro, G.M.; Vanoli, G.P. Design of the building envelope: A novel multi-objective approach for the optimization of energy performance and thermal comfort. *Sustainability* 2015, 7, 10809–10836.
7. Capozzoli, A.; Gorrino, A.; Corrado, V. A building thermal bridges sensitivity analysis. *Appl. Energy* 2013, 107, 229–243.
8. Ge, H.; McClung, V.R.; Zhang, S. Impact of balcony thermal bridges on the overall thermal performance of multi-unit residential buildings: A case study. *Energy Build.* 2013, 60, 163–173.
9. Cappelletti, F.; Gasparella, A.; Romagnoni, P.; Baggio, P. Analysis of the influence of installation thermal bridges on windows performance: The case of clay block walls. *Energy Build.* 2011, 43, 1435–1442.
10. Citterio, M.; Cocco, M.; Erhorn-Klutting, H. Thermal Bridges in the EPBD Context: Overview on MS Approaches in Regulations. Available online: <http://www.buildup.eu/sites/default/files/>

P064_EN_ASIEPI_WP4_IP1_p3073.pdf (accessed on 15 June 2015).

11. Gao, Y.; Roux, J.J.; Zhao, L.H.; Jiang, Y. Dynamical building simulation: A low order model for thermal bridges losses. *Energy Build.* 2008, 40, 2236–2243.
12. Tadeu, A.; Simoes, I.; Simoes, N.; Prata, J. Simulation of dynamic liner thermal bridges using a boundary element method model in the frequency domain. *Energy Build.* 2011, 43, 3685–3695.
13. Ascione, F.; Bianco, N.; de Masi, R.F.; Mauro, G.M.; Musto, M.; Vanoli, G.P. Experimental validation of a numerical code by thin film heat flux sensors for the resolution of thermal bridges in dynamic conditions. *Appl. Energy* 2014, 124, 213–222.
14. Ascione, F.; Bianco, N.; De Masi, R.F.; de' Rossi, F.; Vanoli, G.P. Simplified state space representation for evaluating thermal bridges in building: Modelling, application and validation of a methodology. *Appl. Therm. Eng.* 2013, 61, 344–354.
15. Sierra, f.; Bai, J.; Maksoud, T. Impact of the simplification of the methodology used to assess the thermal bridge of the head of an opening. *Energy Build.* 2015, 87, 342–347.
16. Albatici, R.; Tonelli, A.M. Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site. *Energy Build.* 2010, 42, 2177–2183.
17. Desogus, G.; Mura, S.; Ricciu, R. Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance. *Energy Build.* 2011, 43, 2613–2620.
18. Martin, K.; Escudero, C.; Erkoreka, A.; Flores, I.; Sala, J.M. Equivalent wall method for dynamic characterization of thermal bridges. *Energy Build.* 2012, 55, 704–714.
19. Bianchi, F.; Pisello, A.L.; Baldinelli, G.; Asdrubali, F. Infrared thermography assessment of thermal bridges in building envelope: Experimental validation in a test room setup. *Sustainability* 2014, 6, 7107–7120.
20. Berggren, B.; Wall, M. Calculation of thermal bridges in (Nordic) building envelopes—Risk of performance failure due to inconsistent use of methodology. *Energy Build.* 2013, 65, 331–339.
21. The International Organization for Standardization (ISO). Thermal Bridges in Building Construction—Linear Thermal Transmittance—Simplified Methods and Default Values; The International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 2007.
22. Petranek, V.; Subrit, R.; Plachy, J.; Nevřivová, L.; Petricek, T.; Kalousek, L.; Čaha, Z. Thermal bridges in insulation system. *Therm. Power Electr. Eng.* 2013.
23. Qasass, R.; Gorgolewski, M.; Ge, H. Timber



- framing factor in Toronto residential house construction. *Archit. Sci. Rev.* 2014, 57, 159–168.
24. Gomes, A.P.; de Souza, H.A.; Tribess, A. Impact of thermal bridging on the performance of building using Light Steel Framing in Brazil. *Appl. Therm. Eng.* 2013, 52, 84–89.
 25. Martin, K.; Erkoreka, A.; Flores, I.; Odriozola, M.; Sala, J.M. Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions. *Energy Build.* 2011, 43, 529–535.
 26. De Andelis, E.; Serra, E. Light steel-frame walls: Thermal insulation performances and thermal bridges. *Energy Procedia* 2014, 45, 362–371.
 27. The International Organization for Standardization (ISO). Building Components and Building Elements—Thermal Resistance and Thermal Transmittance—Calculation Method; The International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 2007.
 28. Rezai, S.H.; Allard, F.; Abelé, C.; Doya, M. Evaluating External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) regarding the building's global performance. *Energy Procedia* 2015, 78, 1562–1567.
 29. Parracha, J.; Borsoi, G.; Flores-Colen, I.; Veiga, R.; Nunes, L.; Dionísio, A.; Gomes, M.G.; Faria, P. Performance parameters of ETICS: Correlating water resistance, bio-susceptibility and surface properties. *Constr. Build. Mater.* 2021, 272, 121956.
 30. Fernandes, C.; de Brito, J.; Cruz, C.O. Architectural integration of ETICS in building rehabilitation. *J. Build. Eng.* 2016, 5, 178–184.
 31. EAD 330965-00-0601 Powder-actuated fastener for the fixing of ETICS in concrete
 32. EOTA TR 025 Point thermal transmittance of plastic anchors for ETICS.
 33. Santos, P.; da Silva, L.S.; Ungureanu, V. *Energy Efficiency of Light-Weight Steel-Framed Buildings*, 1st ed.; Technical Committee 14– Sustainability & Eco-Efficiency of Steel Construction; European Convention for Constructional Steelwork (ECCS): Brussels, Belgium, 2012; ISBN 978-92-9147-105-8.
 34. Choi, J.-S.; Kim, C.-M.; Jang, H.-I.; Kim, E.-J. Detailed and fast calculation of wall surface temperatures near thermal bridge area. *Case Stud. Therm. Eng.* 2021, 25, 100936.
 35. Г. Г. Фаренюк, О. Б. Олексієнко Аналіз критеріїв оцінки фасадних конструктивних систем зі штукатурним шаром, *Наука та будівництво*. 2020. 26(4). С. 3–14.
 36. Г. Г. Фаренюк, О. Б. Олексієнко Аналіз нових критеріїв оцінки фасадних систем з штукатурним шаром з урахуванням європейського досвіду, *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2020, С. 150–161.
 37. ДСТУ 9191:2022. Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для

утеплення будівель. – Київ: Укрархбудінформ, 2022. – 63 с.

REFERENCES

1. ISO. (2007). Thermal Bridges in Building Construction—Heat Flows and Surface Temperatures—Detailed Calculations. Geneva, Switzerland: The International Organization for Standardization (ISO).
2. Theodosiou, T. G., & Papadopoulos, A. M. (2008). The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions. *Energy and Buildings*, 40, 2083–2089.
3. Evola, G., Margani, G., & Marletta, L. (2011). Energy and cost evaluation of thermal bridge correction in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 43, 2385–2393.
4. Ascione, F., Bianco, N., de Rossi, F., Turni, G., & Vanoli, G. P. (2012). Different methods for the modelling of thermal bridges into energy simulation programs: Comparisons of accuracy for flat heterogeneous roofs in Italian climates. *Applied Energy*, 97, 405–418.
5. Theodosiou, T., Tsikaloudaki, K., Bikas, D., Aravantinos, D., & Kontoleon, K. N. (2015). Assessing the use of simplified and analytical methods for approaching thermal bridges with regard to their impact on the thermal performance of the building envelope. Retrieved from http://wsb14barcelona.org/programme/pdf_poster/P-059.pdf
6. Ascione, F., Bianco, N., de Masi, R. F., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2015). Design of the building envelope: A novel multi-objective approach for the optimization of energy performance and thermal comfort. *Sustainability*, 7, 10809–10836.
7. Capozzoli, A., Gorrino, A., & Corrado, V. (2013). A building thermal bridges sensitivity analysis. *Applied Energy*, 107, 229–243.
8. Ge, H., McClung, V. R., & Zhang, S. (2013). Impact of balcony thermal bridges on the overall thermal performance of multi-unit residential buildings: A case study. *Energy and Buildings*, 60, 163–173.
9. Cappelletti, F., Gasparella, A., Romagnoni, P., & Baggio, P. (2011). Analysis of the influence of installation thermal bridges on windows performance: The case of clay block walls. *Energy and Buildings*, 43, 1435–1442.
10. Citterio, M., Cocco, M., & Erhorn-Klutting, H. (2015). Thermal Bridges in the EPBD Context: Overview on MS Approaches in Regulations. Retrieved from http://www.buildup.eu/sites/default/files/P064_EN_ASIEPI_WP4_IP1_p3073.pdf
11. Gao, Y., Roux, J. J., Zhao, L. H., & Jiang, Y. (2008). Dynamical building simulation: A low order model for thermal bridges losses. *Energy and Buildings*, 40, 2236–2243.



12. Tadeu, A., Simoes, I., Simoes, N., & Prata, J. (2011). Simulation of dynamic liner thermal bridges using a boundary element method model in the frequency domain. *Energy and Buildings*, 43, 3685–3695.
13. Ascione, F., Bianco, N., de Masi, R. F., Mauro, G. M., Musto, M., & Vanoli, G. P. (2014). Experimental validation of a numerical code by thin film heat flux sensors for the resolution of thermal bridges in dynamic conditions. *Applied Energy*, 124, 213–222.
14. Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., de' Rossi, F., & Vanoli, G. P. (2013). Simplified state space representation for evaluating thermal bridges in building: Modelling, application and validation of a methodology. *Applied Thermal Engineering*, 61, 344–354.
15. Sierra, F., Bai, J., & Maksoud, T. (2015). Impact of the simplification of the methodology used to assess the thermal bridge of the head of an opening. *Energy and Buildings*, 87, 342–347.
16. Albatici, R., & Tonelli, A. M. (2010). Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site. *Energy and Buildings*, 42, 2177–2183.
17. Desogus, G., Mura, S., & Ricciu, R. (2011). Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance. *Energy and Buildings*, 43, 2613–2620.
18. Martin, K., Escudero, C., Erkoreka, A., Flores, I., & Sala, J. M. (2012). Equivalent wall method for dynamic characterization of thermal bridges. *Energy and Buildings*, 55, 704–714.
19. Bianchi, F., Pisello, A. L., Baldinelli, G., & Asdrubali, F. (2014). Infrared thermography assessment of thermal bridges in building envelope: Experimental validation in a test room setup. *Sustainability*, 6, 7107–7120.
20. Berggren, B., & Wall, M. (2013). Calculation of thermal bridges in (Nordic) building envelopes – Risk of performance failure due to inconsistent use of methodology. *Energy and Buildings*, 65, 331–339.
21. ISO. (2007). *Thermal Bridges in Building Construction – Linear Thermal Transmittance – Simplified Methods and Default Values*. Geneva, Switzerland: The International Organization for Standardization (ISO).
22. Petranek, V., Subrit, R., Plachy, J., Nevřivová, L., Petricek, T., Kalousek, L., & Čaha, Z. (2013). Thermal bridges in insulation system. *Thermal Power and Electrical Engineering*.
23. Qasass, R., Gorgolewski, M., & Ge, H. (2014). Timber framing factor in Toronto residential house construction. *Architectural Science Review*, 57, 159–168.
24. Gomes, A. P., de Souza, H. A., & Tribess, A. (2013). Impact of thermal bridging on the performance of building using Light Steel Framing in Brazil. *Applied Thermal Engineering*, 52, 84–89.
25. Martin, K., Erkoreka, A., Flores, I., Odriozola, M., & Sala, J. M. (2011). Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions. *Energy and Buildings*, 43, 529–535.
26. De Andelis, E., & Serra, E. (2014). Light steel-frame walls: Thermal insulation performances and thermal bridges. *Energy Procedia*, 45, 362–371.
27. ISO. (2007). *Building Components and Building Elements – Thermal Resistance and Thermal Transmittance – Calculation Method*. Geneva, Switzerland: The International Organization for Standardization (ISO).
28. Rezai, S. H., Allard, F., Abelé, C., & Doya, M. (2015). Evaluating External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) regarding the building's global performance. *Energy Procedia*, 78, 1562–1567.
29. Parracha, J., Borsoi, G., Flores-Colen, I., Veiga, R., Nunes, L., Dionísio, A., Gomes, M. G., & Faria, P. (2021). Performance parameters of ETICS: Correlating water resistance, bio-susceptibility and surface properties. *Construction and Building Materials*, 272, 121956.
30. Fernandes, C., de Brito, J., & Cruz, C. O. (2016). Architectural integration of ETICS in building rehabilitation. *Journal of Building Engineering*, 5, 178–184.
31. EAD 330965-00-0601 Powder-actuated fastener for the fixing of ETICS in concrete
32. EOTA TR 025 Point thermal transmittance of plastic anchors for ETICS.
33. Santos, P., da Silva, L. S., & Ungureanu, V. (2012). *Energy Efficiency of Light-Weight Steel-Framed Buildings* (1st ed.). Brussels, Belgium: European Convention for Constructional Steelwork (ECCS). ISBN 978-92-9147-105-8.
34. Choi, J.-S., Kim, C.-M., Jang, H.-I., & Kim, E.-J. (2021). Detailed and fast calculation of wall surface temperatures near thermal bridge area. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100936.
35. Farenuk, H.H., & Olexienko, O.B. (2020). Analysis of criteria for assessing facade structural systems with plaster layer. *Science and Construction*, 26(4), 3-14.
36. Farenuk, H.H., & Olexienko, O.B. (2020). Analysis of new criteria for assessing facade systems with plaster layer considering European experience. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 150-161.
37. DSTU 9191:2022. (2022). *Thermal insulation of buildings. Method for selecting thermal insulation materials for building insulation*. Kyiv: Ukrarkhbudininform.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2023 року