

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТЕРМІЧНО НЕОДНОРІДНИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ГРОМАДСЬКОЇ БУДІВЛІ

І. О. Суходуб, кандидат технічних наук, доцент

П. Ю. Сердечний, аспірант (науковий керівник І. О. Суходуб)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: p.serdechnyi@kpi.ua

Анотація. *Енергоефективність будівель є ключовим пріоритетом для сучасної України, оскільки безпосередньо впливає не лише на комфорт і безпеку мешканців, а й на економічну та екологічну ситуацію в країні. Будівлі державного сектору, які можуть становити до 20 % від загального фонду будівель в Україні, можуть слугувати моделями для підвищення теплоізоляції та енергоефективності для широких верств населення. Серед заходів щодо підвищення енергоефективності будівель значна увага приділяється покращенню теплової оболонки та зменшенню втрат тепла через різні види теплових мостів. Динамічне моделювання є ефективним інструментом для оцінки впливу термічно неоднорідних елементів на загальну енергетичну ефективність будівлі та тепловий комфорт. Нині в Україні існують різні методи оцінки величини та впливу теплових містків на загальні втрати будівлі в теплопередачі, починаючи від спрощених підходів до більш детальних, що потребують значних витрат часу. Тому необхідність складних розрахунків ставиться під сумнів, особливо коли може бути достатньо простіших методів.*

Одним із найважливіших факторів, що впливають на потреби будівлі в енергії, є коефіцієнт теплопередачі, який вимірює кількість тепла, що проходить через огороджувальні конструкції будівлі за одиницю часу на одиницю різниці температур. Цей коефіцієнт залежить від типу матеріалу, товщини і характеристик поверхні конструкції. Лінійні та точкові теплові включення значно впливають на передачу тепла, а спрощені методи оцінки їх впливу часто призводять до вищих втрат при передачі. Навпаки, більш детальні оцінки забезпечують більшу точність, особливо при розгляді конкретних елементів дизайну, таких як віконні та дверні рами. Це дослідження спрямоване на розробку та перевірку енергетичної моделі для будівлі з використанням програмного забезпечення DesignBuilder для врахування динамічних навколишніх і внутрішніх умов, а також їх впливу на потреби в енергії для опалення та охолодження. Проведено порівняльний аналіз теплових включень у зовнішніх стінах будівлі з оцінкою коефіцієнтів тепловіддачі за різними методологіями.

Об'єктом дослідження є типова будівля школи Києва, збудована в середині ХХ ст. Будівля складається з кількох секцій різної висоти і обслуговує приблизно 600 учнів і співробітників. Енергетичне моделювання проводилося в DesignBuilder/EnergyPlus з використанням погодинних даних для Києва. Було

проаналізовано декілька сценаріїв, у тому числі базовий сценарій без теплових включень і додаткові сценарії, які враховують теплові включення з різними рівнями деталізації.

Результати показують, що ігнорування теплових включень може призвести до недооцінки потреб будівлі в енергії для опалення та охолодження. Врахування лінійних і точкових теплових включень збільшує потребу в опаленні на 8,3 % порівняно з базовим сценарієм. Спрощений метод оцінки теплових включень призводить до найбільшого збільшення на 13,3 %. Різниця між найбільш деталізованим і спрощеним методами становить приблизно 5 %. Подібні тенденції спостерігаються для попиту на охолодження, де добре ізольовані оболонки уповільнюють природний процес охолодження, що призводить до більшого споживання енергії для кондиціонування повітря.

Дослідження показує, що теплові включення суттєво впливають на річну потребу будівлі в енергії, причому різниця в потребі в опаленні коливається від 8,3 % до 13,3 % залежно від методу оцінки. Спрощені методи, які використовують поправочні коефіцієнти, як правило, переоцінюють потребу в енергії порівняно з більш детальними оцінками. Дослідження підкреслює важливість обліку теплових включень при оцінці енергоефективності в будівлях. Майбутні дослідження мають бути зосереджені на більш детальному CFD моделюванні критичних елементів конструкції з тепловими включеннями, щоб краще зрозуміти їхній вплив на споживання енергії.

Ключові слова: *енергоефективність, енергетичне моделювання будівель, теплопровідні включення, енергопотреба на опалення та охолодження, будівлі з близьким до нульового рівнем споживання енергії*

Актуальність. 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. І саме тому при впровадженні проектів нового будівництва та реконструкції так важливо приділяти увагу аспектам енергетичної ефективності будівель. У відповідь на наведені виклики, Україною було реалізовано нормативно-правову базу, метою якої є реалізація положень директиви Європейського Союзу з енергоефективності будівель [1]. Фундаментальним правовим компонентом забезпечення підвищення рівня енергоефективності будівель є Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» [2], що супроводжується відповідною нормативно-правовою базою із сертифікації енергетичної ефективності та методології оцінки енергетичної ефективності будівель та рівня мінімальних вимог з теплового захисту для об'єктів нового будівництва та тих, що реконструюються [3]. Також варто зазначити, що для

існуючих будівель потенціал зниження кінцевого енергоспоживання може складати до 80 % в залежності від типу будівлі та класу енергоефективності після проекту комплексної термомодернізації [4]. Сектор громадських будівель, який за різними оцінками може складати до 20 % від загального фонду будівель України відповідно до [5], може слугувати гарним прикладом впровадження заходів з підвищення рівня теплового захисту оболонки будівель для населення України. 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 у будівлі, а також спостерігати за зміною рівня енергоспоживання при зміні різних вхідних даних. Так, нині в Україні доступні різні методи оцінки величини й, відповідно, впливу теплопровідних включень на загальні трансмісійні тепловтрати будівель. Ці методи варіюються від простих та узагальнених до більше детальних, які потребують значно більшу затрату часу. Тому постає питання доцільності складних розрахунків показників теплопровідних включень порівняно з більш простими та узагальненими.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Особливо важливим параметром, що впливає на рівень енергопотреби будівлі, є показник теплопередачі трансмісією, який 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, його товщини, форми та поверхневих характеристик конструкції. Значний вплив на теплопередачу трансмісією вчиняють лінійні та точкові коефіцієнти теплопровідних включень. Відповідно до спрощеної оцінки впливу теплопровідних включень у методиці [6] за відсутності інформації чи її недостатній кількості щодо теплопровідних включень у конструкції переважно існуючих будівель, можливо використовувати коригуючу поправку ΔU_{tb} до

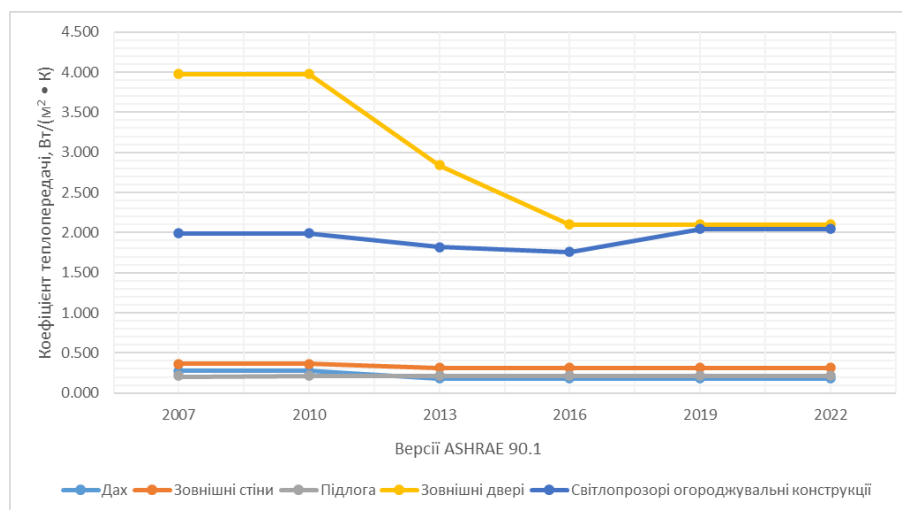
коефіцієнта теплопередачі по основному полю, розрахункові значення якої наведені в таблиці 1.

1. Додаткова складова до коефіцієнта теплопередачі

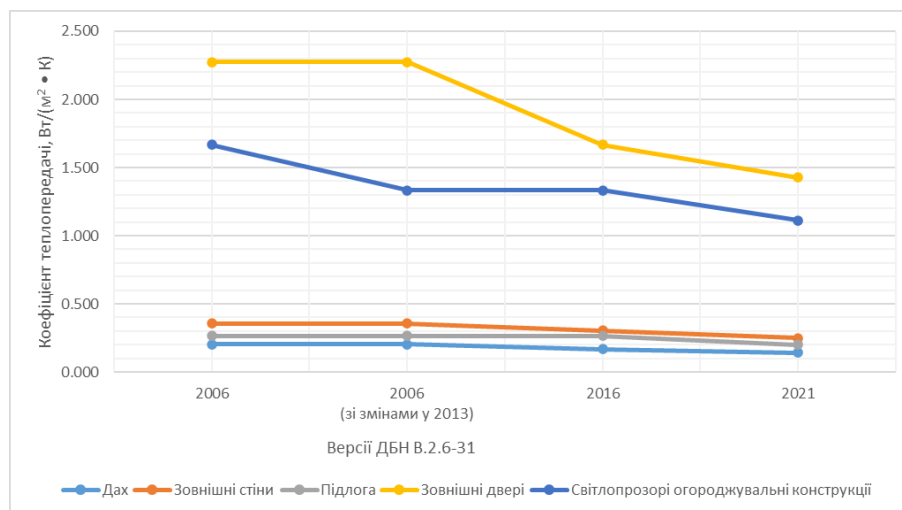
Середнє значення коефіцієнта теплопередачі непрозорої частин конструкцій, Вт/(м ² · К)	$\Delta U_{\text{тб}}$, Вт/(м ² · К)
$U_{\text{op,mn}} \geq 0,8$	0,0
$0,4 \leq U_{\text{op,mn}} \leq 0,8$	0,05
$U_{\text{op,mn}} \leq 0,4$	0,10

Варто зазначити, що наведені в таблиці показники додаткової складової коефіцієнту теплопередачі зазвичай сильно завищують кінцеве значення коефіцієнту теплопередачі та є досить грубим методом обчислення. У додатках Г та Д до [7] наведена велика 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 [8], але важливо зазначити, що в цьому стандарті 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 [9]. Цей 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, а також надає правила для визначення коефіцієнтів теплопередачі та теплового потоку і мінімальних поверхневих температур теплопровідного включення. Метод обчислення теплопровідного включення, який використовується у [9], 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. Стандарт

[10] 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. При тому, що точну температуру внутрішньої поверхні можна обчислити за допомогою двовимірної моделі, реальна мінімальна поверхнева температура може бути нижча за наявності інших лінійних або точкових теплопровідних включень поруч. Визнаним міжнародним стандартом щодо визначення рівня енергоефективності будівель також є [11]. Вимоги з врахуванням термічно неоднорідних ОК були опубліковані лише в останній версії стандарту, прийнятій у січні 2023 року. Так, регламентується мінімізація впливу теплопровідних включень шляхом застосування чітко визначених технік з ізоляції типових з'єднань огорожувальних конструкцій. Відповідно до [12] 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 рис. 1.



a



б

Рис. 1. Теплопередача огорожувальних конструкцій відповідно до стандарту ASHRAE 90.1 (а) ДБН В.2.6-31 (б) в період з 2006 до 2022 року

Оскільки розрахунок теплових потоків та визначення граничних температур є досить складним математичним процесом, часто використовують програмне забезпечення для аналізу відповідних параметрів та визначення характеристик теплопровідних включень у термічно неоднорідних конструкція будівель. Серед таких програм варто зазначити THERM - безкоштовний програмний продукт, який дозволяє моделювати двовимірні теплопровідні включення в будівельних конструкціях, який базується на методі скінченних елементів, що дозволяє розраховувати теплові потоки, поверхневі температури, коефіцієнти теплопередачі, коефіцієнти опору теплопередачі та інші параметри, які характеризують тепловий режим конструкцій будинку. Програма THERM сумісна з іншими програмами для розрахунку енергоефективності будівель, такими як WINDOW, EnergyPlus, TRNSYS тощо. Програмний продукт Ansys/Fluent – це ще один потужний інструмент, який дозволяє моделювати та аналізувати різноманітні явища в області рідинної динаміки. У роботі програми застосовуються чисельні методи для розв'язання рівнянь, що описують поведінку рідин, газів, твердих тіл та їх взаємодію. В середовищі Ansys/Fluent CFD можна моделювати передачу тепла і маси в рідинах, газах, твердих тілах, фазових переходах, хімічних реакціях. Програмний продукт Flixo – це програма для гігро-термічного аналізу будівельних конструкцій та матеріалів, яка дозволяє моделювати та розраховувати теплові потоки, поверхневі температури, коефіцієнти теплопередачі, коефіцієнти теплового опору, ризик

конденсації на будь-яких поверхнях. Програмний продукт Solido – це програмний продукт для теплового аналізу будівельних конструкцій, який дозволяє моделювати теплові процеси в складних геометріях дво- та тривимірних конструкцій, тобто розглядати тепловтрати для складних будівельних вузлів.

Серед вітчизняних науковців питання визначення впливу теплопровідних включень також є актуальним. Так, у роботі Олексієнко розглядається проблема точкових теплопровідних включень, які можуть суттєво впливати на енергоефективність фасадних систем із зовнішньою теплоізоляцією [13]. Теплові містки, що виникають через кріплення або інші елементи конструкцій, призводять до теплових втрат, що знижує загальну ефективність теплоізоляції. Тому дослідження з використанням 3D-моделювання дозволяє точно оцінити ці втрати та знайти рішення для мінімізації впливу теплових містків. Науковці Ратушняк, Горюн, та Лялюк у своїй статті [14] аналізують примикання віконного блоку до зовнішньої стіни та на основі отриманих результатів з моделювання теплового потоку через конструктивний вузол приходять до висновку, що таке примикання є недостатньо енергоефективними та пропонується зменшення величини тепловтрат через зміни в конструктивному виконанні вузла примикання. У роботі Крамаренка та Білоус [15] також досліджуються теплопровідні включення в місцях примикання віконних відкосів до зовнішньої стіни з акцентом для будівель із високими вимогами до енергоефективності (nZEB). Дослідження показує, що теплові містки в конструкціях з газоблоків мають більший вплив на втрати тепла, ніж у стінах із силікатної цегли. Зменшення опору теплопередачі, викликане теплопровідними включеннями, досягає до 48% для газоблоків. Пропонується використання стандартів ДСТУ та EN для точних розрахунків, а також подальша інтеграція з програмою EnergyPlus для динамічного моделювання.

Мета дослідження - розроблення та апробація енергетичного моделювання будівлі з використанням програмного забезпечення DesignBuilder, що дозволить врахувати динамічні параметри зовнішнього середовища та внутрішніх компонентів на рівень енергопотреб на опалення та охолодження будівлі. Провести порівняльний аналіз впливу термічно неоднорідних огорожувальних елементів у

конструкції зовнішніх стін будівлі та приведеного коефіцієнта теплопередачі, визначеним за різними методиками.

Матеріали і методи дослідження. Об'єктом енергетичного моделювання є будівля середньої загальноосвітньої школи м. Києва, яка побудована за типовим проектом початку другої половини ХХ ст. Будівля школи складається з чотириповерхової та двох одноповерхових секцій. У школі навчається та працює близько 600 учнів та 70 робітників, відповідно. Система опалення та гарячого водопостачання є централізованими. Наявні чавунні радіатори. Терморегулюючі головки на приладах опалення відсутні. Подача теплоносія стояками опалення є розбалансованою. Застосовується залежна схеми приєднання до центральної мережі теплопостачання з використанням триходового клапану та циркуляційних насосів. Наявне автоматичне погодозалежне регулювання температури подачі теплоносія. Приміщення будівлі вентилуються через відкриття вікон та інфільтрацію. Загальна площа будівлі становить 7386,8 м², а загальний об'єм становить 23399,7 м³. Висота поверху становить 3,0 м. Зовнішні стіни виконані з порожнистої керамічної цегли на цементно-піщаному розчині, та є неутеплені. Частина вікон металопластикові, інша – дерев'яні. Наявні також скляні блоки. Перекриття залізобетонні. В неопалювальному горіщі перекриття утеплено шаром керамзиту. Суміщене перекриття - без теплової ізоляції.

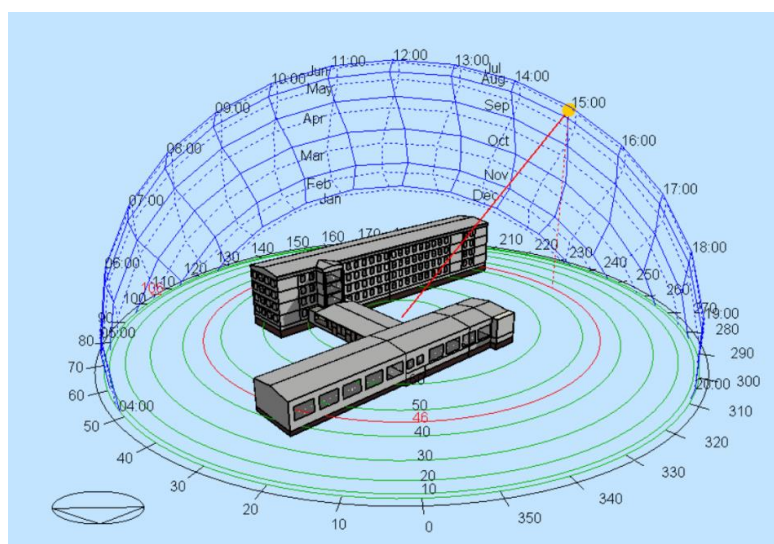


Рис. 2. 3D модель будівлі загальноосвітнього закладу

Енергетичне моделювання виконувалось у програмному середовищі DesignBuilder/EnergyPlus. Як ресурс кліматичних даних використовувався кліматичний файл погоди IWEC з годинним кроком дискретизації даних для м. Київ. 3D модель будівлі з програми DesignBuilder/EnergyPlus наведена на рис. 2.

2. Характеристики огорожувальних конструкцій

Сценарій	Базовий (без ТВ)	Запропонований (без ТВ)	Запропонований (ΔU_{tb})	Запропонований (Ψ - та χ - коефіцієнти)	Запропонований (Ψ - та χ - коефіцієнти і деталізоване вікно)
Тип ОК	U_{op}	U_{op}	$U_{op} + \Delta U_{tb}$	U_{pr}	U_{pr}
Зовн. стіни	0.868	0.249	0.349	0.319	0.319
Опалювальний підвал (стіни)	0.419	0.289	0.289	0.289	0.289
Перекриття неопалювального горища	0.708	0.165	0.165	0.165	0.165
Суміщене перекриття	1.253	0.143	0.143	0.143	0.143
Перекриття неопалювального підвалу	1.314	0.199	0.199	0.199	0.199
Світлопрозорі конструкції	2.457	1.11	1.11	1.11	3.476 (UPVC рама) 1.000 (склопакет)
Вхідні двері	2.457	1.11	1.11	1.11	1.11
Підлога до ґрунту	1.402	0.369	0.369	0.369	0.369

У роботі було розглянуто декілька сценаріїв аналізу рівня енергопотреби. Базовий (без ТВ) сценарій характеризує існуючий стан теплової оболонки без врахування теплопровідних включень та внутрішні умови комфортності, налаштовані відповідно до чинних вимог. Запропонований (без ТВ) сценарій демонструє рівень енергопотреби з опором огорожувальних конструкцій відповідно до чинних вимог [3], без врахування теплопровідних включень та з використанням системи рекуперації теплоти у системі механічної вентиляції будівлі. Запропонований (ΔU_{tb}) сценарій з врахуванням поправочного коефіцієнта

для опору теплопередачі зовнішніх стін відповідно до [6]. Запропонований (Ψ - та χ - коефіцієнти) з лінійними та точковими теплопровідними включеннями відповідно до [7]. Запропонований з лінійними та точковими теплопровідними включеннями в зовнішніх стінах та з врахуванням деталізованого моделювання віконних конструкцій з врахуванням впливу рами на показники склопакету (Ψ - та χ - коефіцієнти і деталізоване вікно). Характеристики розглянутих огорожувальних конструкцій наведено в табл. 2.

Результати дослідження та їх обговорення. Порівняння отриманих результатів наведено на рис. 3.

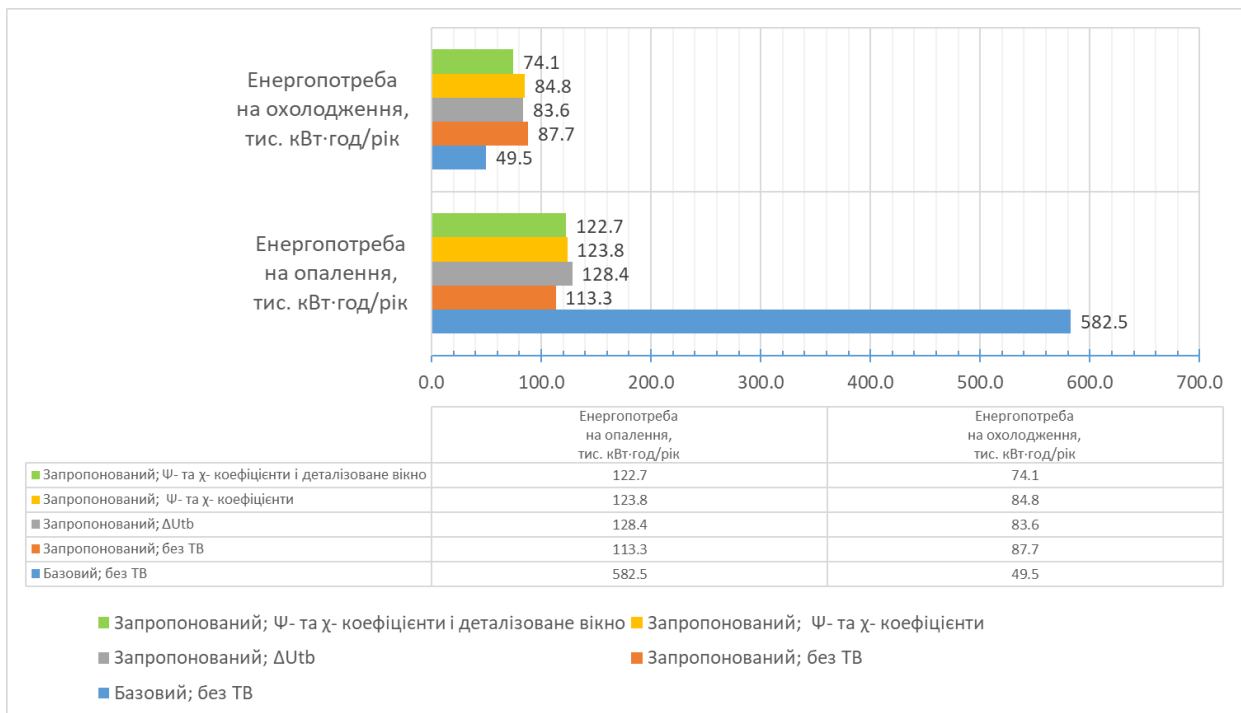


Рис. 3. Енергопотреба на опалення та охолодження.

З отриманих результатів випливає, що врахування теплопровідних включень впливає на кінцеву величину енергопотреби як на опалення, так і на охолодження. Запропонований сценарій з урахуванням лінійних та точкових теплопровідних включень та деталізованим методом моделюванням віконних конструкцій на 8,3 % збільшує енергопотребу будівлі на опалення порівняно з сценарієм коли вплив теплопровідних включень ігнорувався. Узагальнений метод оцінки теплопровідних включень дає найбільший приріст рівня енергопотреби у 13,3 %, а різниця між

найбільш детальним та узагальненим сценаріями становить 5 %. Аналогічні тенденції спостерігаються і при аналізі зміни енергопотреби на охолодження з тим фактором, що при високих температурах зовнішнього повітря краще ізольована огорожувальна конструкція сповільнює природне охолодження будівлі й, відповідно, збільшується кількість енергії, яка потрібна для кондиціонування будівлі.

Висновки і перспективи. З отриманих результатів випливає, що вплив теплопровідних включень на рівень річної енергопотреби є значним фактором, який не варто ігнорувати при визначенні показників енергетичної ефективності будівель. Так, різниця в енергопотребі на опалення між запропонованим сценарієм без врахування теплопровідних включень та з включеннями становить від 8,3 % до 13,3 %. Використання спрощеного методу з використанням поправочного коефіцієнту ΔU_{tb} завищує енергетичні показники будівлі порівняно з більш детальними методами врахування теплопровідних включень. Також видно, що різниця річної енергопотреби на опалення та охолодження мінімальна для сценаріїв, коли теплотехнічні характеристики світлопрозорих огорожувальних конструкцій задаються для загальної системи та при більш детальному моделюванні окремо склопакету, а окремо рами.

У подальшому вбачається доцільним проведення більш детального та глибокого CFD моделювання ключових конструктивних вузлів з теплопровідними включеннями та дослідження їх впливу на рівень енергопотреби на опалення та охолодження, а також на гігро-термічний стан будівлі.

Список використаних джерел

1. Директива Європейського Парламенту і Ради 2010/31/ЄС від 19 травня 2010 року про енергетичні характеристики будівель. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011-10#Text
2. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 р. №2118-VIII. Голос України. 2017. 22 липня. (№134). Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0825-18#n16>
3. ДБН В.2.6–31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. На заміну ДБН В.2.6–31:2016; чинний від 2022-09-01. Вид. офіц. Київ: Держ. підприємство “Укрархбудінформ”, 2021. 23 с
4. З 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).

5. 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 (дата звернення: 09.09.2024).

6. 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

7. ДСТУ 9191:2022. Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. На заміну ДСТУ Б В.2.5-189:2013 ; чинний від 2023-03-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 199 с.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. ASHRAE 90.1-2022. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. – Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2022. – 400 p.

12. ASHRAE 169-2021. Climatic Data for Building Design Standards. – Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021. – 36 p.

13. Олексієнко, А. В. Вплив точкових теплопровідних включень на енергоефективність фасадних систем із зовнішньою теплоізоляцією. Наука та будівництво. 2020. № 3(220). С. 45–52. [Електронний ресурс]. URL: <https://journal-niisk.com/index.php/scienceandconstruction/article/view/220/198>

14. Ратушняк, Г. С., Горюн, І. П., Лялюк, О. І. Аналіз енергоефективності примикань віконних блоків до зовнішніх стін. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2021. № 2. С. 104–112. [Електронний ресурс]. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/35432/104041.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

15. Крамаренко, С., Білоус, О. Вплив теплопровідних включень у примиканнях віконних відкосів на енергоефективність будівель із високими вимогами до енергоефективності. Матеріали конкурсу «Енергія і середовище». 2021. [Електронний ресурс]. URL: <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2021/03/kramarenko-s.-kpi-im.-igorya-sikorskogo.pdf>

References

1. Dyrektyva Yevropeiskoho Parlamentu i Rady 2010/31/IeS vid 19 travnia 2010 roku pro enerhetychni kharakterystyky budivel [European Parliament and Council Directive 2010/31/EU of 19 May 2010 on the energy performance of buildings]. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011-10#Text
2. Pro enerhetychnu efektyvnist budivel: Zakon Ukrainy vid 22.06.2017 r. №2118-VIII.[On Energy Efficiency of Buildings: Law of Ukraine dated 22.06.2017 No. 2118-VIII]. Holos Ukrainy. 2017. July 22. (No. 134). Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0825-18#n16>
3. DBN V.2.6–31:2021. Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel [State Building Codes V.2.6–31:2021. Thermal insulation and energy efficiency of buildings. Replaces State Building Codes V.2.6–31:2016; effective from 2022-09-01. Official ed.]. Kyiv: State Enterprise "Ukrarhbudininform", 2021, 23.
4. 3 poverkhy i bilshe – Typolohizatsiia budivel v Ukraini. Typolohizatsiia budivel v Ukraini – (BTU). [3 floors and more – Building typology in Ukraine. Building Typology in Ukraine – (BTU)]. Available at: <http://building-typology.com.ua/schools/s3-floors-and-more/> (Accessed: 09.09.2024).
5. Pochatok ta zavershennia budivnytstva obiektiv. [Beginning and completion of construction projects]. State Statistics Service of Ukraine. Available at: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2020/bud/kzp_Ukr/kzp_Ukr18-20ue.xlsx (Accessed: 09.09.2024)
6. DSTU 9190:2022. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pid chas opalennia, okholodzhennia, ventyliatsii, osvittlennia ta hariachoho vodopostachannia [DSTU 9190:2022. Energy efficiency of buildings. Method of calculating energy consumption for heating, cooling, ventilation, lighting, and hot water supply. Replaces DSTU B A.2.2-12:2015; effective from 01.03.2023]. Kyiv: SE "UkrNDNC", 2022, 199.
7. DSTU 9191:2022. Teploizoliatsiia budivel. Metod vyboru teploizoliatsiinoho materialu dlia uteplennia budivel [DSTU 9191:2022. Thermal insulation of buildings. Method of selecting thermal insulation material for building insulation. Replaces DSTU B V.2.5-189:2013; effective from 01.03.2023]. Kyiv: SE "UkrNDNC", 2022, 199.
8. DSTU ISO 14683:2007. Teploprovodni vkluchennia v budivelnykh konstruktsiiakh. Liniinyi koefitsient teploperedavannia. Sproshcheni metodyky rozrakhovuvannia ta standartni znachennia (ISO 14683:1999, IDT). [DSTU ISO 14683:2007. Thermal bridges in building constructions. Linear thermal transmittance coefficient. Simplified calculation methods and standard values (ISO 14683:1999, IDT). Effective from 01.10.2009]. Kyiv: DERZHSPZHIVSTANDARD, 2007, 20 p.
9. DSTU ISO 10211-1:2005. Teploprovodni vkluchennia v budivelnykh konstruktsiiakh. Obchyslennia teplovykh potokiv i poverkhnevyykh temperatur. Chastyna 1. Zahalni metody (ISO 10211-1:1995, IDT)DSTU ISO 10211-1:2005. Thermal bridges in building constructions. Heat flow and surface temperature calculations. Part 1: General methods (ISO 10211-1:1995, IDT). Introduced for the first time; effective from 01.03.2008. Kyiv: SE "UkrNDNC", 2007, 38 p.

10. DSTU ISO 10211-2:2005. Teploprovodni vkluchennia v budivelnykh konstruktsiiah. Obchyslennia teplovykh potokiv i poverkhnevyykh temperatur. Chastyna 2. Liniini teploprovodni vkluchennia (ISO 10211-2:1995, IDT). [DSTU ISO 10211-2:2005. Thermal bridges in building constructions. Heat flow and surface temperature calculations. Part 2: Linear thermal bridges (ISO 10211-2:1995, IDT). Introduced for the first time; effective from 01.03.2008]. Kyiv: SE "UkrNDNC", 2007, 20.

11. ASHRAE 90.1-2022. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2022, 400.

12. ASHRAE 169-2021. Climatic Data for Building Design Standards. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2021, 36.

13. Oleksienko, A. V. (2020). Vplyv tochkovykh teploprovodnykh vkluchen na enerhoefektyvnist fasadnykh system iz zovnishnoiu teploizolatsiieiu [Influence of point thermal bridges on the energy efficiency of facade systems with external insulation]. Science and Construction, (3), 45–52. Available at: <https://journal-niisk.com/index.php/scienceandconstruction/article/view/220/198>.

14. Ratushnyak, H. S., Horyun, I. P., Lialyuk, O. I. (2021). Аналіз енергоефективності примикань віконних блоків до зовнішніх стін [Analysis of the energy efficiency of window-to-wall junctions]. Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute, (2), 104–112. Available at: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/35432/104041.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.

15. Kramarenko, S., & Bilous, O. (2021). Vplyv teploprovodnykh vkluchen u prylykanniakh vikonnykh vidkosiv na enerhoefektyvnist budivel iz vysokymy vymohamy do enerhoefektyvnosti [Influence of thermal bridges in window junctions on the energy efficiency of buildings with high energy efficiency requirements]. Materials of the competition "Energy and Environment". Available at: <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2021/03/kramarenko-s.-kpi-im.-igorya-sikorskogo.pdf>

ANALYSIS OF THE IMPACT OF THERMALLY HETEROGENEOUS ENCLOSING STRUCTURES ON THE ENERGY PERFORMANCE OF A PUBLIC BUILDING

I. Sukhodub, P. Serdechnyi

Abstract. *Energy efficiency in buildings is a key priority for modern Ukraine, as it directly influences not only the comfort and safety of occupants but also the country's economic and environmental situation. Public sector buildings, which may represent up to 20% of the total building stock in Ukraine, can serve as models for enhancing thermal insulation and energy efficiency for the wider population. Among the measures for improving building energy efficiency, significant attention is given to improving the thermal envelope and reducing heat losses through various types of thermal bridges. Dynamic modeling is an effective tool for assessing the impact of thermally heterogeneous elements on a building's overall energy performance and thermal comfort. Currently, in Ukraine, various methods exist to assess the magnitude and impact of thermal bridges on a building's total heat transmission losses, ranging from simplified approaches to more*

detailed ones that require significant time investment. Therefore, the necessity of complex calculations is questioned, especially when simpler methods may suffice.

One of the most critical factors affecting a building's energy demand is the heat transmission coefficient, which measures the amount of heat that passes through the building envelope per unit time per unit temperature difference. This coefficient depends on the material type, thickness, and surface characteristics of the construction. Linear and point thermal bridges significantly affect heat transmission, with simplified methods for evaluating their impact often resulting in higher transmission losses. In contrast, more detailed assessments provide greater accuracy, particularly when considering specific design elements such as window and door frames. This study aims to develop and test an energy model for a building using DesignBuilder software to account for dynamic environmental and internal conditions, and their effect on heating and cooling energy demands. A comparative analysis of thermal bridges in the building's external walls is conducted, with heat transfer coefficients evaluated using different methodologies.

The object of the study is a typical school building in Kyiv, constructed in the mid-20th century. The building consists of multiple sections with different heights and serves approximately 600 students and staff. The energy modeling was conducted in DesignBuilder/EnergyPlus, using hourly weather data for Kyiv. Several scenarios were analyzed, including a base scenario without thermal bridges and additional scenarios that account for thermal bridges with various levels of detail.

The results show that ignoring thermal bridges can lead to an underestimation of the building's heating and cooling energy demands. Accounting for linear and point thermal bridges increases the heating demand by 8.3 % compared to the base scenario. The simplified method for evaluating thermal bridges leads to the highest increase of 13.3 %. The difference between the most detailed and the simplified methods is approximately 5 %. Similar trends are observed for cooling demand, where well-insulated envelopes slow down the natural cooling process, leading to higher energy consumption for air conditioning.

The study shows that thermal bridges significantly affect the building's annual energy demand, with heating demand differences ranging from 8.3% to 13.3% depending on the assessment method. Simplified methods that use correction factors tend to overestimate the energy demand compared to more detailed evaluations. The research highlights the importance of accounting for thermal bridges when assessing energy efficiency in buildings. Future studies should focus on more detailed CFD modeling of critical construction elements with thermal bridges to better understand their impact on energy consumption.

Key words: energy efficiency, building energy modeling, thermal bridges, heating and cooling energy demand, nearly zero-energy buildings