

ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ШКОЛИ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИНАМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ЗМІНІ ВИМОГ ДО ТЕПЛООВОГО ЗАХИСТУ

В. І. Дешко, доктор технічних наук, професор

І. Ю. Білоус, кандидат технічних наук, доцент

О. О. Голубенко, аспірант (науковий керівник В. І. Дешко)

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»*

E-mail: biloys_inna@ukr.net

***Анотація.** У статті автори проводять порівняльний аналіз впливу мінімальних норм ізоляції будівель згідно з ДБН В. 2.6-31:2016 та ДБН В. 2.6-31:2021 на енергоефективність шкільних будівель. Використовували динамічне моделювання та нестационарну енергетичну модель. При покращенні теплового захисту за ДБН В.2.6-31:2016 та ДБН В.2.6-31:2021 споживання енергії знижується так: при покращенні стін до рівня ДБН 2.6-31 2016 на 9,7 %, стелі - на 10 %, вікон - на 1,1 % і всієї оболонки до мінімальних вимог 2.6-31 2016 на 20 %; при покращенні стін до рівня ДБН 2.6-31 2021 на 9, 8%, стелі - на 10,2 %, вікон - на 1,8 % і всієї оболонки до мінімальних вимог 2.6-31 2021 на 22,5 %. Результати демонструють важливість розуміння динаміки температурних змін, їх впливу на енергоефективність та необхідність дослідження взаємодії різних факторів для розробки оптимальних стратегій покращення енергоефективності будівель.*

***Ключові слова:** споживання теплової енергії, динамічні моделі, теплова ізоляція будівель*

Актуальність. Враховуючи глобальну енергетичну кризу та зміну клімату, енергоефективність освітніх закладів, зокрема шкіл, стає важливим питанням. Зміни вимог до теплового захисту сприяють комфорту учнів та енергоефективності будівель. Застосування динамічного моделювання для оцінки енергоефективності шкіл дозволяє отримувати точні результати та розробляти ефективні енергозберігаючі стратегії враховуючі деталізацію і різні аспекти умов експлуатації.

Підвищення енергоефективності шкіл сприяє оптимізації витрат на освіту, а результати дослідження можуть слугувати базою для рекомендацій та методичних матеріалів для зацікавлених сторін. Розвиток нових технологій та матеріалів у галузі

енергозбереження може покращити енергетичний сектор та довкілля. Тому оцінка енергоефективності школи при зміні вимог до теплового захисту за допомогою динамічного моделювання є актуальним завданням для сталого розвитку суспільства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях активно вивчається питання енергоефективності шкільних будівель, зокрема в контексті зміни вимог до теплового захисту. Науковці застосовують різні методи та підходи до оцінки енергоефективності, включаючи динамічне моделювання.

У дослідженні Сміта та співавторів [1] розглядаються теплові втрати шкільних будівель з урахуванням різних рівнів теплоізоляції та впливу теплових мостів на загальну енергоефективність. Результати динамічного моделювання та показали, що використання сучасних теплоізоляційних матеріалів може значно знизити теплові втрати та відповідні витрати на опалення.

У дослідженні Йохансона та колег [2] аналізуються можливості оптимізації системи опалення шкіл за допомогою динамічного моделювання з використанням спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання енергетичних систем (EnergyPlus). Розроблена модель дозволяє враховувати вплив змін в архітектурі будівлі, різні режими експлуатації та сезонність на енергоефективність системи. Результати свідчать про значне зниження витрат на опалення при впровадженні оптимальних режимів експлуатації.

Дослідження Мартінса та колег [3] зосереджено на розвитку алгоритмів для динамічного моделювання енергоефективності шкільних будівель із застосуванням регресійних моделей та нейромереж. Завдяки цьому вдається забезпечити високу точність прогнозування енергоспоживання та розробки ефективних заходів з енергозбереження.

Загалом, аналіз останніх досліджень свідчить про активне вивчення питань енергоефективності шкільних будівель та застосування динамічного моделювання у цьому контексті. Відзначається важливість впровадження сучасних теплоізоляційних матеріалів, оптимізації систем опалення, та розробки алгоритмів для точного прогнозування енергоспоживання.

Проте, досі існує значний потенціал для подальших досліджень у цій області, зокрема щодо адаптації досліджених методів та підходів до конкретних умов різних регіонів, зокрема України, врахування специфіки шкільних будівель різного типу та віку, а також розробки комплексних рішень для підвищення енергоефективності з урахуванням екологічних та економічних аспектів. Один із напрямів подальшого дослідження полягає у розвитку української нормативної бази, яка враховує результати динамічного моделювання будівель. Це може включати розробку та оновлення нормативів, стандартів та методик щодо енергоефективності, а також інтеграцію динамічних моделей у процеси планування та сертифікації будівель. Використання динамічних моделей може сприяти розвитку науково-технічної бази України в галузі енергоефективності та покращити енергетичну ефективність шкільних будівель, що, в свою чергу, сприятиме сталому та екологічно стабільному майбутньому країни.

Таким чином, тема "Оцінювання енергоефективності школи при зміні вимог до теплового захисту за допомогою динамічного моделювання" є досить актуальною та перспективною для подальших наукових досліджень, спрямованих на досягнення сталого розвитку суспільства та забезпечення комфортних умов навчання у шкільних будівлях.

Мета дослідження – оцінка енергоефективності шкільних будівель при зміні вимог до теплового захисту, використовуючи динамічне моделювання для розробки оптимальних рішень щодо теплоізоляції, архітектурних особливостей та систем опалення.

Матеріали та методи дослідження. ДБН В. 2.6-31 встановлює мінімальні норми теплової ізоляції та енергоефективності будівель в Україні. Нещодавно стандарт ДБН В 2.6-31 2016 [4] року було оновлено, і на його зміну прийшов ДБН В 2.6-31 2021 [5]. У рамках оновлення нормативу зросли вимоги до мінімального рівня теплової ізоляції огорожувальних конструкцій. Однак, попри суворіші вимоги до теплофізичних характеристик будівель, нова редакція ДБН не встановлює більш жорстких вимог щодо загального енергоспоживання будівель.

Українські стандарти відповідають міжнародним нормам, таким як ISO 50001 (2018) "Системи управління енергією – Вимоги та настанови щодо використання" [6] та EN 16001:2009 "Системи управління енергією - Вимоги з настановами для використання" [7]. Застосування цих стандартів сприяє підвищенню енергоефективності та зменшенню енергоспоживання будівель, враховуючи місцеві кліматичні умови та інші важливі фактори. Така відповідність стандартів, насамперед, пов'язана з прагненням України інтегруватися до Європейського Союзу, а також з більшим досвідом європейських колег в сфері енергоефективності, оскільки західні країни раніше вибрали шлях сталого розвитку.

Водночас, у Сполучених Штатах Америки діють свої стандарти щодо енергоефективності будівель, такі як ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1 "Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings" та International Energy Conservation Code (IECC). Ці стандарти відрізняються від українських за деякими аспектами, але загалом мають схожі цілі щодо забезпечення енергоефективності та зменшення енергоспоживання будівель.

Ще більш сучасний та комплексний підхід до енергоефективності будівель пропонує Net Zero Energy Building (NZEB) [8].

NZEB є концепцією в сфері енергоефективності будівель, яка передбачає створення будівель з нульовим енергоспоживанням на річній основі. У NZEB загальна кількість спожитої енергії у будівлі компенсується виробленням відновлюваної енергії на місці або на ділянці. Такі будівлі характеризуються високим рівнем енергоефективності, який досягається завдяки оптимізації пасивних та активних стратегій управління енергією, а також використання сучасних енергоефективних технологій і матеріалів. NZEB сприяють сталому розвитку, знижують вплив на навколишнє середовище та забезпечують економічні переваги для власників та користувачів будівель.

Для досягнення статусу Net Zero Energy Building (NZEB) в кліматичній зоні України, огорожуючі конструкції мають відповідати певним вимогам, що забезпечують високий рівень теплової ізоляції та енергоефективності:

- Тепловий опір (R-значення) огорожуючих конструкцій має бути значно вищим, ніж мінімальні вимоги ДБН В 2.6-31 2021. Це допомагає зменшити тепловтрати та енергоспоживання на опалення.

- Використання енергоефективних вікон з низьким коефіцієнтом теплопередачі (U-значення) та високим сонячним фактором (g-значення) для забезпечення кращої світлопропускнув здатності та зменшення тепловтрат.

- Проектування та орієнтація будівлі таким чином, щоб максимізувати сонячне освітлення та пасивне опалення протягом опалювального сезону, а також забезпечити ефективне природне охолодження протягом літніх місяців.

- Забезпечення герметичності будівлі для зменшення несанкціонованого проникнення повітря та уникнення тепловтрат через нещільності.

- Застосування ефективних систем вентиляції з рекуперацією тепла для забезпечення комфортного внутрішнього мікроклімату та зниження енергоспоживання.

- Впровадження систем відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі, вітрові турбіни або геотермальні системи, для виробництва електроенергії та/або тепла на місці споживання.

- Враховуючи зростаючу важливість енергоефективності на світовому рівні, можна очікувати, що українські стандарти продовжуватимуть розвиватися у відповідності до світових норм, а країна зосередиться на впровадженні інноваційних рішень та технологій для підвищення енергоефективності своїх будівель. Це сприятиме сталому розвитку України та збільшить її конкурентоспроможність на світовому ринку.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є будівля школи, яка розташована в Івано-Франківській області. Ця будівля є триповерховою спорудою Н-подібної форми, що включає в себе спортивний зал, повноцінну їдальню з кухнею та навчальні приміщення.

Стіни будівлі складаються з червоної цегли товщиною 0,525 м, без додаткової ізоляції. Вікна виконані з металопластикового профілю та оснащені двокамерними склопакетами, які були встановлені під час нещодавньої заміни. Підлога складається

з бетонної плити товщиною 0,25 м, встановленої на ґрунті, та фінішного покриття. Дах складається з бетонної плити товщиною 0,25 м, вкритої бітумом.

Опалення будівлі забезпечується індивідуальною котельнею, розташованою в окремому приміщенні. Система водяного опалення є двотрубною. Гаряче водопостачання забезпечується за допомогою електричного бойлера, встановленого безпосередньо поблизу місця використання (на кухні).

Механічна вентиляція відсутня в будівлі. Система охолодження не передбачена.

Освітлення в будівлі забезпечується світлодіодними світильниками.

Цей об'єкт дослідження вибрано з метою аналізу поточного рівня енергоефективності та виявлення можливих напрямків покращення енергоефективності за допомогою впровадження сучасних технологій та відповідного оновлення будівельних норм і стандартів. Аналіз енергоефективності цієї будівлі допоможе розробити рекомендації щодо впровадження енергозберігаючих заходів та оптимізації енергоспоживання для типових будівель школи Н-подібної форми.

Проведення досліджень

За допомогою динамічного моделювання та нестационарної енергетичної моделі проведено аналіз впливу мінімальних норм ізоляції відповідно до ДБН В. 2.6-31:2016 та ДБН В. 2.6-31:2021 на рівень енергоефективності школи.

Для більш детального дослідження впливу мінімальних вимог ДБН В 2.6-31 2016 та ДБН В 2.6-31 2021 до термічного опору огорожувальних конструкцій, було розроблено такі моделі:

Базова модель, що відображає поточний стан будівлі з урахуванням нормативних параметрів мікроклімату;

Теплоізоляція стін з досягненням нормативних значень термічного опору;

Теплоізоляція даху з досягненням нормативних значень термічного опору;

Теплоізоляція підлоги з досягненням нормативних значень термічного опору;

Комплексна модернізація всіх огорожувальних конструкцій з досягненням нормативних значень їх термічного опору.

Параметри огорожувальних конструкцій використаних в моделях наведені в таблиці.

1. Коефіцієнт теплопередачі огорожувальних конструкцій, використані в моделях, Вт/м²К

Тип огородження	Існуючий стан	ДБН В.2.6-31:2016	ДБН В.2.6-31:2021
Зовнішні стіни	0,8	0,30	0,25
Вікна	1,67	1,33	1,11
Дах	0,89	0,167	0,143

Нестаціонарна енергетична модель, розроблена у програмі DesignBuilder [9], є ключовим інструментом в оцінці впливу мінімальних норм ізоляції на рівень енергоефективності школи. Вона дозволяє враховувати динаміку змін зовнішніх умов та розподілу тепла всередині будівлі, що є важливим для об'єктів з різними функціональними зонами, як школи. Такий підхід дозволяє проводити точніші прогнози та рекомендації щодо впровадження енергоефективних рішень.

У моделі об'єкту дослідження були просимульовані кожне приміщення як окрема термічна зона з індивідуальним графіком присутності людей, температурою та електричним обладнанням залежно від призначення приміщення, всього 149 термічних зон.

Програма DesignBuilder надає можливість моделювати та аналізувати енергетичні показники будівель, враховуючи різні фактори, такі як кліматичні умови, теплофізичні властивості матеріалів, геометрію будівлі, системи опалення, охолодження та освітлення. Завдяки інтеграції з EnergyPlus [10], DesignBuilder забезпечує високу точність розрахунків енергоспоживання та комфорту всередині приміщень. Графік експлуатації будівлі враховує типові робочі години для дітей та вчителів, вихідні, типові свята та канікули. Мікроклімат заданий згідно з [11] та [12].

Кліматологія, що була використана в моделюванні взята з International Weather for Energy Calculations 2 (IWEC2) [13].

IWEC2- це база даних кліматичних параметрів, створена для енергетичних розрахунків та енергетичного моделювання будівель. Ці дані засновані на реальних

погодних спостереженнях і включають середні місячні та годинні показники. IWEC2 містить такі кліматичні дані:

- Температура повітря: середня місячна максимальна, мінімальна та середня температура повітря, а також годинні дані.
- Відносна вологість: середні місячні та годинні значення відносної вологості.
- Сонячна радіація: горизонтальна та вертикальна на різні орієнтації будівель, середні місячні та годинні значення.
- Оподи: середні місячні кількості опадів та днів з опадами.
- Швидкість вітру: середні місячні та годинні значення швидкості вітру, а також напрямок вітру.
- Небесна хмарність: середні місячні та годинні значення хмарності (відсоток покриття неба хмарами).

Використання нестационарної енергетичної моделі, розробленої в DesignBuilder, дозволяє враховувати взаємодію між різними частинами енергоспоживання будівлі, що сприяє кращому розумінню впливу оновлених мінімальних норм ізоляції на енергоефективність школи та дозволяє розробити оптимальні рішення для підвищення енергоефективності цього об'єкта.

Результати досліджень та їх обговорення. За результатами моделювання було побудовано ряд графіків, що відображають енергоспоживання системою опалення будівлі в річному (рис. 1), помісячному (рис. 2) та погодинному зрізах (рис. 3 та 4).

Результати динамічного моделювання підтверджують, що покращення теплового захисту як до рівня як ДБН 2.6-31 2016, так і 2021 може суттєво знизити річне споживання енергії на опалення.

При цьому, найбільший ефект від впровадження окремих заходів досягається при покращенні стелі та стін. Відповідно, зміна теплової ізоляції стін до рівня ДБН 2.6-31 2016 дозволяє зменшити річне споживання на опалення на 8,5 %, а покращення стелі - на 9,97 % порівняно з базовим варіантом, а до рівня ДБН 2.6-31 2021 на 9,74 % та 10,35 % відповідно.

Покращення теплової ізоляції вікон також відіграє важливу роль у зменшенні енергоспоживання, але його вплив є менш вираженим у цьому випадку, оскільки будівля нещодавно проходила заміну вікон.

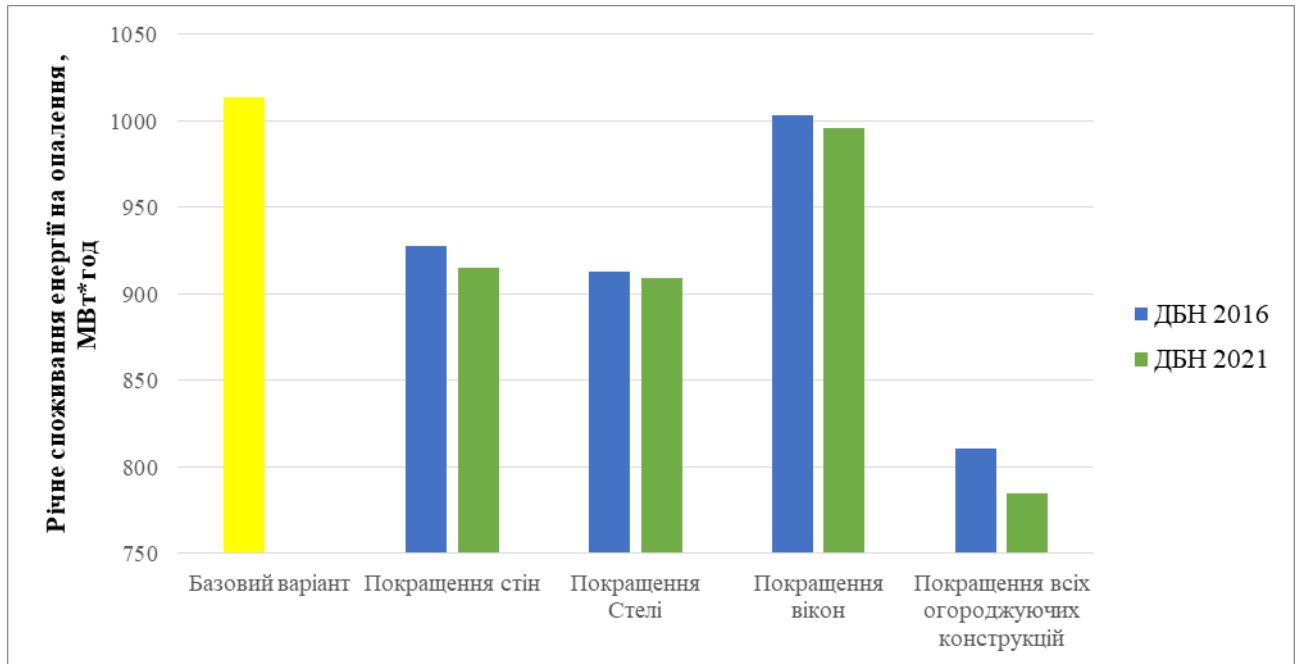


Рис.1. Річне споживання енергії на опалення

Кумулятивне застосування заходів з покращення теплового захисту оболонки будівлі (стіни, стеля, вікна) до мінімальних вимог ДБН 2.6-31 2016 дозволяє знизити річне споживання на опалення на 20,02 % порівняно з базовим варіантом. У той же час, покращення оболонки будівлі до вимог ДБН 2.6-31 2021 призводить до зменшення енергоспоживання на 22,55 % відносно базового варіанту.

Перехід від вимог ДБН 2.6-31 2016 до ДБН 2.6-31 2021 у цілому забезпечує додаткове зниження річного споживання енергії на опалення на 2,53 % порівняно з ситуацією, коли застосовуються тільки вимоги ДБН 2.6-31 2016.

Отже, результати дослідження підкреслюють важливість комплексного підходу до покращення теплового захисту шкільних будівель, а також дають уявлення про вплив переходу від вимог ДБН 2.6-31 2016 до вимог ДБН 2.6-31 2021 на енергоефективність будівлі та зниження енергоспоживання на опалення.

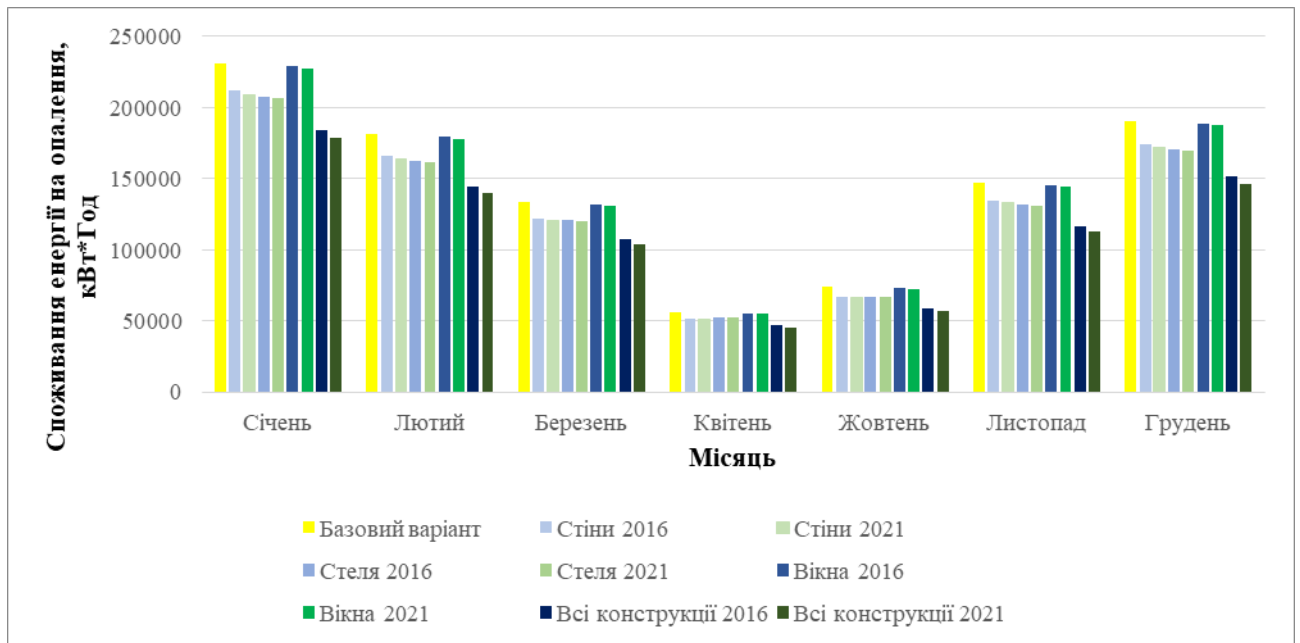


Рис. 2. Помісячне споживання енергії на опалення для опалювального періоду

Результати помісячного аналізу свідчать про те, що оптимізація теплозахисту будівлі згідно з вимогами ДБН 2.6-31 (2016 та 2021 років) виявляється у відносному вимірі найбільш ефективною не в найхолодніший період року, а в місяці зі стрімкими змінами температур. Отримані дані вказують на значущість процесу зниження температури навколишнього середовища, а не просто низької температури самої. Як приклад, для листопаду відносне зниження споживання енергії на опалення складає 20,78 % та 23,33 % (2016 та 2021 ДБН), а для грудня 20,04 % та 23,07 %. Водночас абсолютне зменшення опалення складає 30593,6 кВт·год та 34332 кВт·год для 2016 та 2021 ДБНів відповідно.

Аналіз динаміки відносної економії енергії в періоди підвищення температур зовнішнього повітря також вказує на те, що вплив інерційності будівлі цю динаміку зменшує. Показники відносної економії енергії для березня (період підвищення температури) становлять 19,55 % та 22,09 % при виконанні мінімальних вимог ДБН 2.6-31 2016 та 2021 років відповідно.

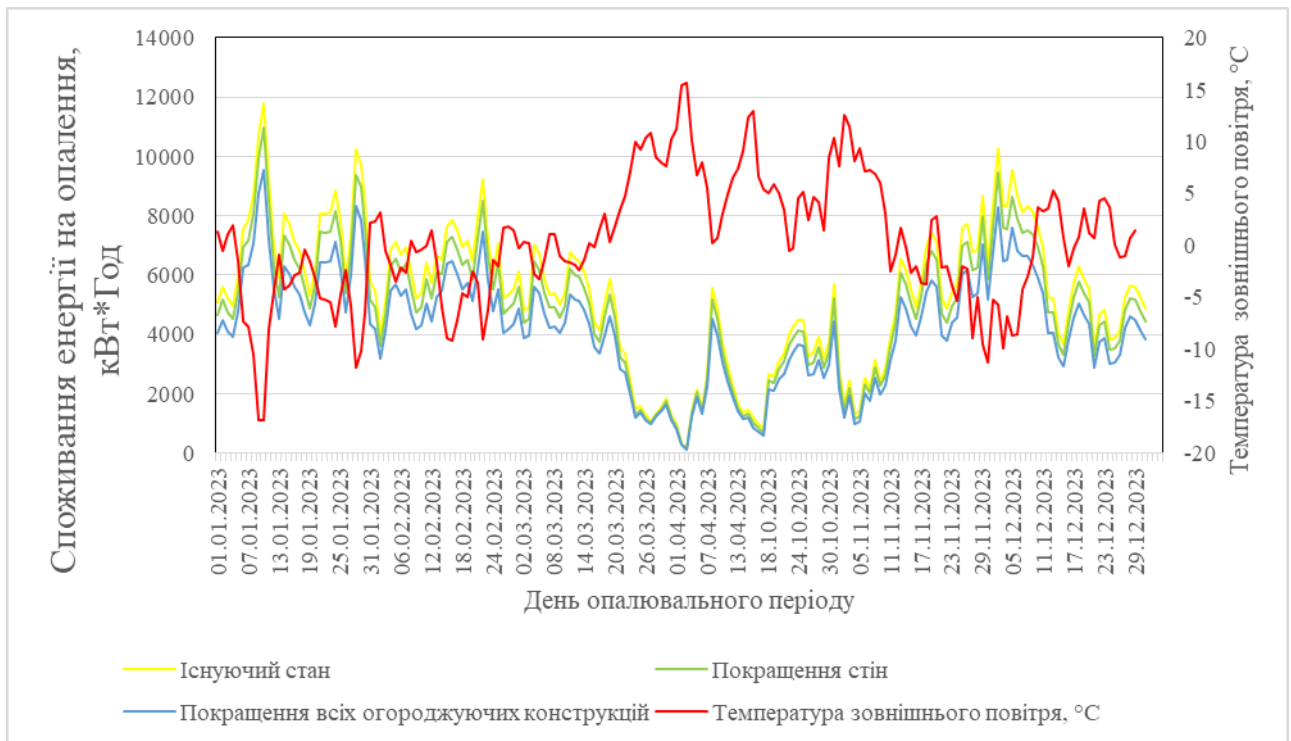
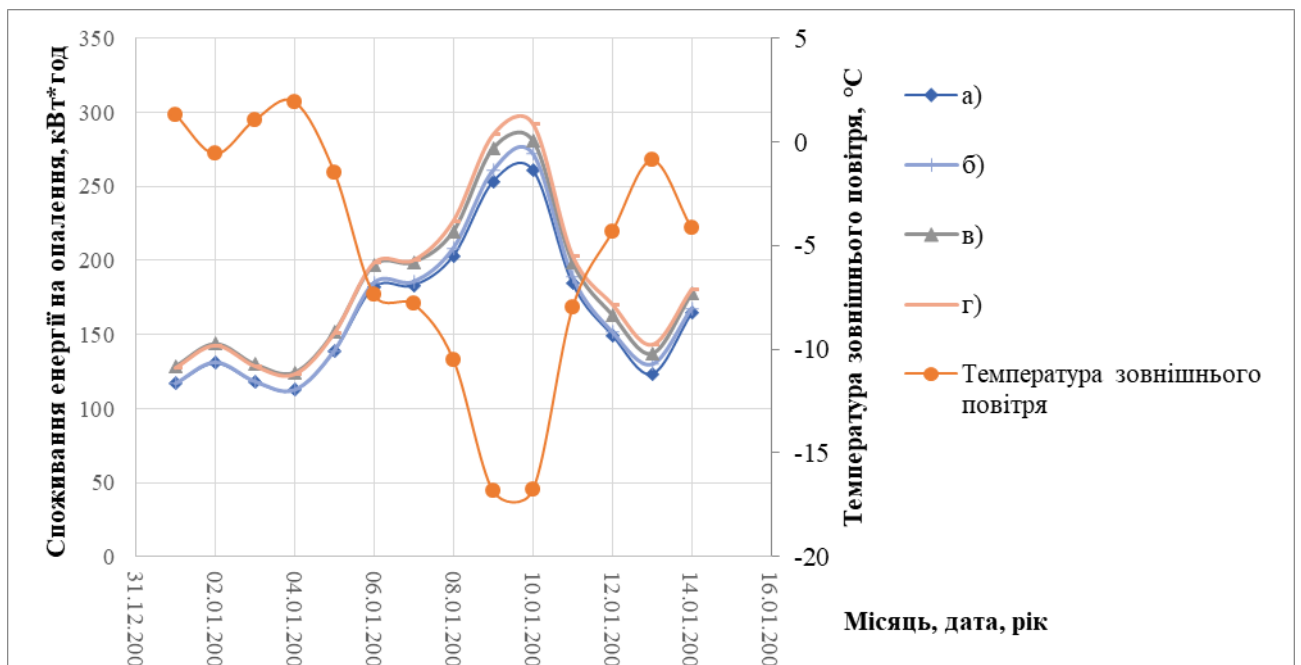


Рис. 3. Поденне споживання енергії на опалення для опалювального періоду для існуючого стану будівлі та покращенні огороджуючих конструкцій до рівня ДБН 2016



Рису. 4. Споживання на опалення для класу на другому поверсі, для двох тижнів січня:

а – ізоляція згідно мінімальних вимог ДБН 2021, орієнтація на Пд; *б* – ізоляція згідно мінімальних вимог ДБН 2021, орієнтація на Пн; *в* – базовий варіант, орієнтація на Пд; *г* – базовий варіант, орієнтація на Пн

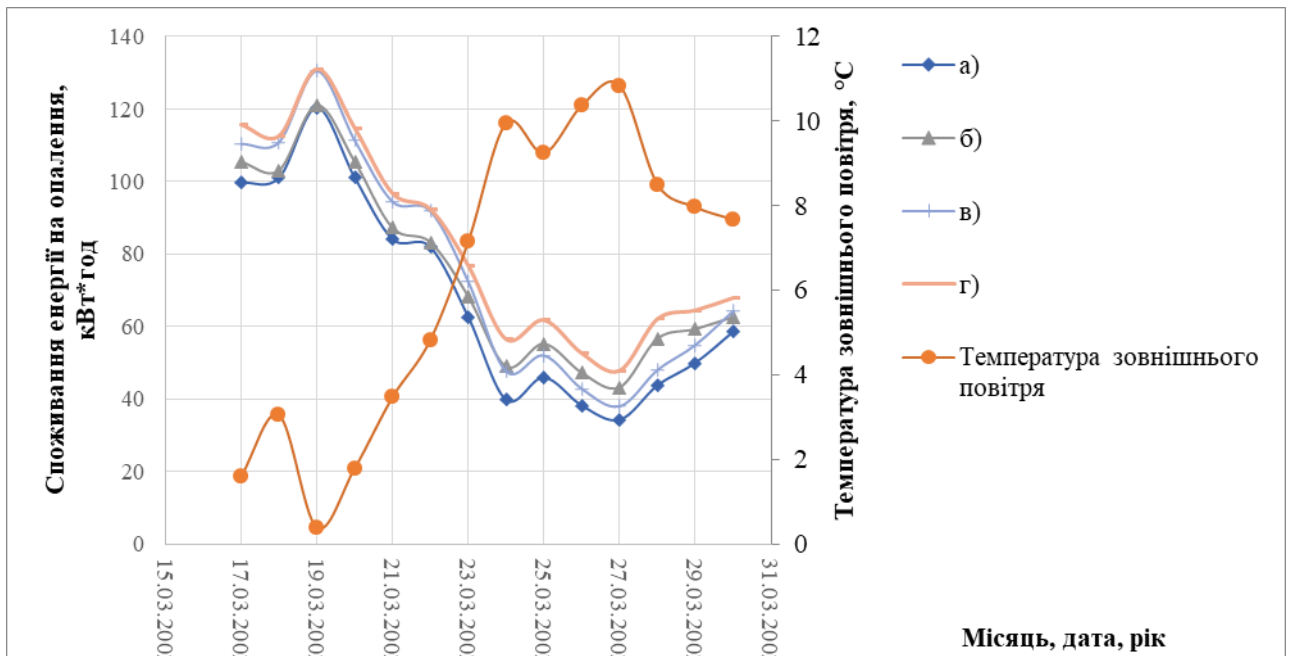


Рис. 5. Споживання на опалення для класу на другому поверсі, для двох тижнів березня:

а – ізоляція згідно мінімальних вимог ДБН 2021, орієнтація на Пд; *б* – ізоляція згідно мінімальних вимог ДБН 2021, орієнтація на Пн; *в* – базовий варіант, орієнтація на Пд; *г* – базовий варіант, орієнтація на Пн

Аналіз добових графіків залежності відносної економії енергії на опалення від амплітуди зниження температури не виявив очікуваної кореляції, що свідчить про наявність більшої кількості взаємопов'язаних факторів, які впливають на ефективність теплоізоляційних покращень. Як приклад, можна привести вплив теплонадходжень від сонця та орієнтація будівлі, що демонструється на рисунках 4 та 5.

Загалом, незалежно від теплофізичних властивостей огорожувальних конструкцій, споживання енергії опалювальною системою є обернено пропорційним до зовнішньої температури. Це відображено на рисунках 3, 4, 5, де графіки споживання енергії та температури виступають дзеркальними відносно одне одного.

Висновки і перспективи. У цій статті було проведено порівняльний аналіз впливу мінімальних норм ізоляції будівель згідно з ДБН В. 2.6-31:2016 та ДБН В. 2.6-31:2021 на енергоефективність школи, використовуючи динамічне моделювання та нестационарну енергетичну модель. Результати підтверджують переваги нових норм ізоляції, які відповідають міжнародним та національним стандартам енергоефективності. Разом з тим, вплив норм цих ДБН на відмінність у споживанні

енергії не є таким суттєвим, як при попередніх змінах. Застосування таких моделей дозволяє робити точніші оцінки енергоспоживання та рекомендації щодо впровадження енергоефективних технологій у проектах будівництва та реконструкції шкіл.

Дослідження також підкреслює важливість розуміння динаміки температурних змін та їх впливу на енергоефективність будівель. Однак, аналіз добових графіків вказує на потребу дослідження взаємодії різних факторів, що впливають на енергоефективність, для отримання більш точної картини та розробки оптимальних стратегій покращення.

Майбутні дослідження можуть включати вивчення впливу на показники енергоефективності будівлі школи переходу до концепції NZEB.

Також, в подальших дослідженнях варто розглянути період охолодження та дослідити більш детально систему гарячого водопостачання (ГВП), що дозволить порівнювати результати дослідження з українськими вимогами до питомого енергоспоживання будівель.

Загалом, ці результати підкреслюють важливість подальшого дослідження та розвитку енергоефективних рішень для шкільних будівель в Україні, що враховують різні внутрішні та зовнішні фактори, а також вимоги до енергоспоживання відповідно до національних та міжнародних стандартів.

Список використаних джерел

1. Smith, A., Johnson, L., & Brown, M. (2019). Assessing the thermal performance of school buildings with different insulation levels and the impact of thermal bridges on energy efficiency. *Building and Environment*, 154, 123-137.
2. Johansson, P., Svensson, E., & Olofsson, T. (2020). Optimization of school heating systems using dynamic simulation: A case study. *Energy and Buildings*, 215, 109-125.
3. Martins, R., Rodrigues, E., & Almeida, M. (2021). Development of algorithms for dynamic modeling of energy efficiency in school buildings using regression models and neural networks. *Applied Energy*, 281, 116-130.
4. ДБН В.2.6-31:2016. Конструкції будинків та споруд. Теплова ізоляція будівель. К.: Мінбуд України, 2017. 37 с.
5. ДБН В.2.6-31:2021. Конструкції будинків та споруд. Теплова ізоляція будівель. К.: Мінбуд України, 2022. 37 с.

6. International Organization for Standardization. (2018). ISO 50001 "Системи управління енергією – Вимоги та настанови щодо використання". Електронний ресурс, <https://www.iso.org/iso-50001-energy-management.html>
7. European Committee for Standardization. (2009). EN 16001 "Системи управління енергією - Вимоги з настановами для використання". Електронний ресурс, <https://globalcad.org/wp-content/uploads/2012/06/DIN-EN-16001-Energy-Management-Systems-in-Practice>
8. European Commission. (б.д.). Nearly zero-energy buildings. Електронний ресурс https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en
9. DesignBuilder Software Ltd. (б.д.). DesignBuilder. Електронний ресурс, <https://designbuilder.co.uk/>
10. EnergyPlus. (б.д.). Електронний ресурс, from <https://energyplus.net/>
11. ДБН В.2.5-67:2013. Санітарно-гігієнічні вимоги до приміщень навчальних закладів.
12. СанПіН 5.5.2.008-2001. Гігієнічні вимоги до повітряного середовища відкритих та закритих приміщень.
13. International Weather for Energy Calculations 2 (IWEC2). (б.д.). Електронний ресурс, <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/weather-data-center>

Referenses

1. Smith, A., Johnson, L., & Brown, M. (2019). Assessing the thermal performance of school buildings with different insulation levels and the impact of thermal bridges on energy efficiency. *Building and Environment*, 154, 123-137.
2. Johansson, P., Svensson, E., & Olofsson, T. (2020). Optimization of school heating systems using dynamic simulation: A case study. *Energy and Buildings*, 215, 109-125.
3. Martins, R., Rodrigues, E., & Almeida, M. (2021). Development of algorithms for dynamic modeling of energy efficiency in school buildings using regression models and neural networks. *Applied Energy*, 281, 116-130.
4. ДБН В.2.6-31:2016. (2017). Конструкטיви будивел та споруд. Теплова изолуясиа будивел [Structures of buildings and structures. Thermal insulation of buildings]. Kyiv: Minbud Ukrayiny, 37.
5. ДБН В.2.6-31:2021 (2022).. Конструкטיви будивел та споруд. Теплова изолуясиа будивел [Structures of buildings and structures. Thermal insulation of buildings]. Kyiv: Minbud Ukrayiny, 37.
6. International Organization for Standardization. (2018). ISO 50001 "Energy management systems – Requirements with guidance for use". Web-resource, <https://www.iso.org/iso-50001-energy-management.html>
7. European Committee for Standardization. (2009). EN 16001 "Energy management systems - Requirements with guidance for use". Web-resource, <https://globalcad.org/wp-content/uploads/2012/06/DIN-EN-16001-Energy-Management-Systems-in-Practice>

8. European Commission. (n.d.). Nearly zero-energy buildings. Web-resource https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en
9. DesignBuilder Software Ltd. (n.d.). DesignBuilder. Web-resource, <https://designbuilder.co.uk/>
10. EnergyPlus. (n.d.). Web-resource, from <https://energyplus.net/>
11. DBN V.2.5-67:2013. Sanitary-hygienic requirements for premises of educational institutions [Sanitary and hygienic requirements for premises of educational institutions].
12. SanPiN 5.5.2.008-2001. Hygienic requirements for the air environment of open and closed premises. [Hygienic requirements for the air environment of open and closed premises].
13. International Weather for Energy Calculations 2 (IWEC2). (n.d.). Web-resource, <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/weather-data-center>

ASSESSMENT OF SCHOOL ENERGY EFFICIENCY USING DYNAMIC MODELING WHEN THERMAL PROTECTION REQUIREMENTS CHANGE

V. Deshko, I. Bilous, O. Holubenko

Abstract. *In this article, the authors conduct a comparative analysis of the impact of minimum insulation standards in accordance with DBN V.2.6-31:2016 and DBN V.2.6-31:2021 on the energy efficiency of school buildings. Using dynamic modeling and a non-steady-state energy model, the study confirms the advantages of new insulation standards that correspond to international and national energy efficiency standards. With the improvement of thermal protection according to DBN V.2.6-31:2016 and DBN V.2.6-31:2021, energy consumption decreases as follows: when improving walls to the level of DBN 2.6-31 2016 by 9.7 %, ceilings - by 10 %, windows - by 1.1 %, and the entire building envelope to the minimum requirements of 2.6-31 2016 by 20 %; when improving walls to the level of DBN 2.6-31 2021 by 9.8 %, ceilings - by 10.2 %, windows - by 1.8 %, and the entire building envelope to the minimum requirements of 2.6-31 2021 by 22.5 %. The results demonstrate the importance of understanding temperature dynamics, their impact on energy efficiency, and the need to study the interaction of various factors for developing optimal improvement strategies.*

Key words: *thermal energy consumption, dynamic models, thermal insulation of buildings*