

В. І. Дешко^{1,2}, д-р техн. наук, проф., І. Ю. Білоус^{1,3}, канд. техн. наук, доцент,
О. О. Голубенко¹, аспірант, П. Ю. Сердечний¹, аспірант, Н. А. Яркова¹, магістр

ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ШКОЛИ З ВРАХУВАННЯМ ЛОКАЛЬНИХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

²Інститут технічної теплофізики НАН України

³Інститут загальної енергетики НАН України

Ключові слова: енергоефективність, опалення, вентиляція, тепловий насос, сонячна панель, DesignBuilder, EnergyPlus.

Вступ. Збереження енергії залишається дуже важливою задачею для нашої країни. У зв'язку з тим, що енергетична галузь зазнала великих втрат у минулі роки, питання енергоефективності стає не тільки питанням збереження грошей або догляду за навколишнім середовищем, але, певним чином, питанням виживання країни в складних обставинах.

Тема енергоефективності добре вивчена з різних боків. У своїй роботі [1] автори досліджують економічну ефективність використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), таких як сонячні панелі, вітряні турбіни, біогазові установки і т.д., в освітніх установках. Розроблена математична модель для оцінки витрат та доходів від впровадження ВДЕ, враховують такі фактори як потреба в електроенергії, тарифи, субсидії, амортизація, екологічні збитки і т.д. Також автори порівнюють різні варіанти фінансування ВДЕ, такі як власні кошти, кредити, лізинг, енергосервіс і т.д. [1].

Робота [2] присвячена дослідженню енергоефективності переривчастих режимів опалення будівель з різними теплофізичними характеристиками огорожувальних конструкцій. Автори використовують квазістаціонарний та динамічний методи для розрахунку температурних полів та теплових потоків в огорожувальних конструкціях та приміщеннях. Автори також порівнюють енергоспоживання та температурний комфорт для різних типів будівель, таких як житлові, адміністративні, громадські, за застосуванням переривчастих режимів опалення. Відсоток економії становить від 8 % до 25 % в залежності від режиму, типу будівлі та періоду року [2].

Наразі актуальним питанням залишається комплексне дослідження майже безоплатних заходів з енергозбереження таких як переривчасті режими опалення, а також заходи для можливості автономного забезпечення будівлі енергією, тобто використання ВДЕ.

Незважаючи на те, що лівова частка споживання енергії припадає на житловий сектор будівель, і саме цій групі споживачів приділяється найбільше уваги в дослідженнях, проте, саме регулювання режимів експлуатації в житловій будівлі має значні обмеження. Ці обмеження, найчастіше, викликані індивідуальними поведінковими особливостями, а також нерегулярністю присутності та відсутності людей. Наприклад, згідно [3] житлові приміщення симулюються за постійним рівнем опалення, рівномірною присутністю людей в приміщеннях та використанням електрообладнання.

Організувати енергозберігаючі режими опалення для бюджетних установ, зокрема освітніх закладів, набагато простіше, ніж для житлових споживачів. Це підтверджується деякими особливостями функціонування цієї категорії споживачів, такими як: стандартні графіки роботи та можливість контролювати наявність людей в різних приміщеннях або будівлях.

З цієї позиції, цікавим предметом дослідження може бути шкільна установа, оскільки, крім вищезгаданих особливостей в школах також: більшу частину часу присутня велика кількість людей, розклад навчання (тобто перебування людей в приміщеннях) заздалегідь відомий для кожного робочого дня, в будівлі перебуває багато дітей – група користувачів дуже вразлива до зниження температури в приміщеннях.

Враховуючи це, а також поширену недостатність фінансування освітньої галузі в країні, раціональне використання систем опалення може бути ефективним та недорогим способом енергозбереження.

Крім того, в майбутньому в рамках реалізації концепції з будівлями з мінімальним споживанням енергії, встановлення періодичних режимів роботи систем опалення, з використанням відновлюваних джерел енергії, допоможе досягти цілей зі зниження впливу на навколишнє середовище.

Мета та завдання. Метою роботи є аналіз ефективності впровадження в систему опалення школи відновлювальних джерел енергії з попередніми термомодернізацією огорожуючих конструкцій та введенням переривчастих режимів опалення і вентиляції за допомогою динамічного моделювання для двох кліматичних зон України.

Для досягнення поставленої мети були виконані наступні завдання:

- 1) Створення математичної моделі у програмному середовищі DesignBuilder;
- 2) Верифікація та тестування моделі;
- 3) Дослідження впливу термоса нації на енергоспоживання будівлі
- 4) Дослідження ефективності переривчастих режимів на опалення та вентиляцію;
- 5) Дослідження ефективності впровадження ВДЕ.

Матеріал і результати досліджень

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є імітаційна модель школи, яка базується на даних реальної будівлі СЗШ, поміщена в кліматичні умови м. Київ та м. Одеса, оскільки ці міста є репрезентативними представниками I та II кліматичних зон України згідно з Будівельною кліматологією [4].

Існуючий стан огорожень:

Стіни будівлі несучі зроблені з керамічної цегли на цементно-піщаному розчині. Стіна має товщину – 510 мм (кладка в дві цеглини). Зовнішні стіни утеплені мінеральною ватою товщиною 100мм, оштукатурені та пофарбовані з двох боків. Зовнішні стіни будівлі – у задовільному стані. Приведений опір теплопередачі $2,91 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, що не відповідає мінімальним нормативним вимогам [5].

Вікна займають площу $323,6 \text{ м}^2$ (коефіцієнт скління фасаду становить 0,195). Вікна двох видів металопластикові енергозберігаючі з подвійним склінням та металопластикові двокамерні. Приведений опір теплопередачі віконних блоків складає $0,61 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, що не відповідає мінімальним нормативним вимогам [5].

Двері головного входу металопластикові заклені двокамерним склопакетом. На дверях є дотягувачі. Двері додаткових входів металопластикові. Приведений опір теплопередачі $0,61 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, що не відповідає мінімальним нормативним вимогам [5].

Дах-шатровий, з неопалювальним горищем. Покрівля – з шиферу і металочерепиці на дерев'яній кроквяній конструкції і риштуванню, без утеплення. Покрівля – у задовільному стані.

Перекриття під неопалювальним горищем залізобетонне без утеплення. Приведений опір теплопередачі складає $0,71 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, що не відповідає мінімальним нормативним вимогам [5].

Частина будівлі має неопалювальний підвал. В підвалі розташовано розведення трубопроводів систем опалення, холодного водопостачання, каналізації. Перекриття підвалу зроблене з залізобетонних плит, бетонної заливки та керамічної плитки. Приведений опір теплопередачі перекриття над неопалюваним підвалом складає $0,34 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, що не відповідає мінімальним нормативним вимогам [5].

Фундамент стрічковий з фундаментних блоків, основою підлоги по ґрунту є піщано-щебенева підсіпка, по ній бетонна стяжка, гідроізоляція, цементно-піщана стяжка.

Частина першого поверху має підлогу по ґрунту. Основою підлоги по ґрунту є піщано-щебенева підсіпка, по ній бетонна стяжка, гідроізоляція, цементно-піщана стяжка, керамічна плитка або паркет. Інформація про наявність у конструкції підлоги спеціальних утеплюючих матеріалів відсутня.

Система опалення від власної газової котельні, яка розташована окремо від будівлі. В котельні встановлено дев'ять індивідуальних газових котлів «МИНИ ДОН-40», загальною потужністю 360 кВт. Теплоносій - вода. Температурний графік 80/60 °С. Циркуляція теплоносія в будівлі відбувається за рахунок циркуляційного насосу. Облік споживання теплової енергії на потреби системи опалення здійснюється за рахунок обліку витрати паливних ресурсів (газу) в натуральному вимірі.

Охолодження в будівлі не передбачене.

Механічна система вентиляції не працює. Вентиляція приміщень будівлі здійснюється в натуральний спосіб за рахунок перепаду тиску в середині та зовні будівлі та повітропроникності огорожувальних конструкцій (через нещільності в віконних конструкціях і відкриті елементи віконних, дверних конструкцій при провітрюванні). Видалення повітря здійснюється через вентиляційні канали, які розташовані в санвузлах, кухнях та в декількох приміщень.

Для освітлення переважно використовуються світлодіодні світильники, люмінесцентні світильники та в малій кількості лампи розжарювання. Система керування освітленням – ручна. Датчики присутності людей – відсутні. Облік споживання електричної енергії на потреби системи освітлення не проводиться.

За допомогою динамічного моделювання у програмному середовищі DesignBuilder було проведено аналіз енергоефективності будівлі, яка пройшла термомодернізації огорожуючих конструкцій та використовує переривчасті графіки опалення, в результаті впровадження відновлювальних джерел енергії та модернізації системи опалення.

Проведення досліджень:

За допомогою інструментів доступних в програмі DesignBuilder [6,7], була створена базова модель школи (рис. 1) та поміщена в кліматичні умови м. Київ та м. Одеса, оскільки ці міста є репрезентативними для I та II кліматичних зон України [4], що дозволило узагальнити отримані результати для всіх типових кліматичних зон України, оскільки DesignBuilder враховує погоду за допомогою міжнародного погодного файлу

IWEC[8,9], який містить годинні дані про температуру, вологість, вітер, опади, сонячну радіацію та інші параметри для певного регіону. Однією з переваг програмного середовища DesignBuilder є можливість використання динамічного методу, тобто врахування зміни всіх параметрів будівлі погодинно. Верифікація моделі була проведена за допомогою порівняльного аналізу енергоспоживання на опалення в програмному середовищі RETScreen[10] для будівлі розташованої в м. Київ, відносна похибка складає 2 %.

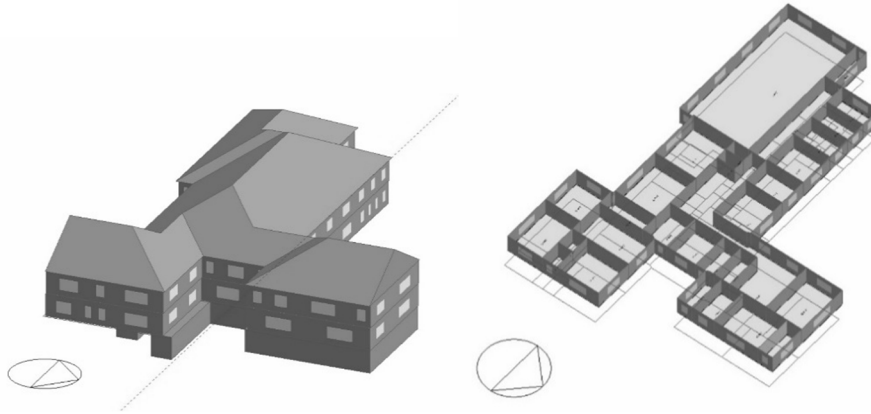


Рисунок 1 – модель школи у DesignBuilder

Основою енергозберігаючих режимів опалення є зниження температури в приміщеннях з опаленням на 3 °С в часи, коли люди в них не перебувають. У роботі взято до уваги, що рекомендується знижувати температуру не більш ніж на 4 °С від нормальної для забезпечення комфортного перебування людей в приміщенні в час переходу від зниженої температури до комфортної [11], а також те, що будівлю школи в основному використовують діти, тому було вирішено обмежитись спадом в 3 °С.

Аналіз проводився для таких режимів опалення, які є найбільш репрезентативними та/або легко реалізуються в умовах закладів освіти сучасної України:

Режим №1 – це базова модель з постійним режимом опалення – режим є звичайним для багатьох закладів освіти в Україні, оскільки в більшості шкіл інший графік неможливо впровадити без технічного оновлення.

Режим №2 – зниження температури до 17 °С у вихідні дні, канікули та святкові дні – режим характеризується відносно малими зусиллями в реалізації, вимагаючи втручання в роботу системи опалення не частіше ніж два рази на тиждень, впливаючи на роботу нагрівача, котла або запірної арматури в ІТП.

Режим №3 зниження температури у вихідні дні, канікули, святкові дні, а також у неробочі години, тобто з 19:00 до 07:00. Так як заняття починаються о 08:00 годині температуру опалення підвищено заздалегідь для комфортних умов перебування у школі – режим характеризується відносно незначними зусиллями, потребуючи втручання в роботу системи опалення не частіше ніж два рази на день, при цьому надає змогу відчутно скоротити часи роботи системи опалення на повну потужність без встановлення програмованих термостатів, або іншої автоматизації.

Режим №4 пониження температури до 17 °С та пониженням рівня повітрообміну до 0,3 год у вихідні дні, канікули та святкові дні.

Режим №5 зниження температури, та пониженням рівня повітрообміну до 0,3 год⁻¹ у вихідні дні, канікули, святкові дні, а також у неробочі години (з 19:00 до 07:00).

Температура в приміщеннях шкіл встановлюється згідно з [4], тому в дослідженні за основу було взято температуру внутрішнього повітря в приміщеннях в 20 °С.

Для вивчення питання підвищення рівня енергоефективності будівлі шкільного закладу шляхом застосування енергоефективних режимів опалення енергетична модель на основі реально існуючої будівлі ЗОШ була використана як базова.

Першим кроком дослідження є застосування вище описаних режимів опалення в базову модель без зміни оболонки чи систем будівлі для двох кліматичних зон.

За результатами моделювання в річному розрізі в Київській кліматичній зоні питоме споживання енергії на опалення було зменшено з 44,5 кВт·год/м³ до 40 кВт·год/м³ при застосуванні режиму 2 та до 36,4 кВт·год/м³ для режиму 3, що становить зниження на 10 % та 18,1 % відповідно.

Отже, для випадку неутепленої будівлі в I кліматичній зоні, застосування опалення за графіками помітно зменшує споживання енергії на опалення. Крім того, результати свідчать про значне зниження споживання при переході від режиму 2 до режиму 3, а саме 9%, підтверджуючи доцільність використання останнього незважаючи на більшу складність технічної реалізації даного режиму опалення.

Для випадку неутепленої будівлі розташованої в кліматичних умовах м. Одеса, енергоспоживання базової моделі складає 40,2 кВт·год/м³, режим опалення №2 показав зменшення в питомому споживанні на опалення до 35,8 кВт·год/м³, а режим 3 до 32,1 кВт·год/м³, що відповідає зменшенню на 11,1 % та 20,1 % відносно базової моделі.

Як і у випадку для м. Київ, режим 3 показав значне підвищення енергоефективності будівлі в порівнянні з режимом 2, а саме 10 %.

Незважаючи на те, що будівлі в м. Одеса показала більшу, в порівнянні з випадком для м. Київ, відносну економію енергії (10 % проти 11,1 % для режиму 2 та 18,1 % проти 20,1 % для режиму 3), різниця питомого споживання є майже однаковою (близько 4,4 та 8,1 кВт·год/м³ відповідно).

Варто зазначити, що для будівель з низьким рівнем теплового захисту в різних кліматичних зонах має приблизно однаковий рівень економії енергії при застосуванні переривчастих режимів опалення.

Результати помісячного аналізу споживання показують наступне:

Споживання для всіх режимів опалення в обох кліматичних зонах найбільше в січні, що пов'язано з найнижчою (порівняно з іншими) середньомісячною температурою в цьому місяці.

Режим 3 є найефективнішим і для м. Київ і для м. Одеса для всіх місяців, що підтверджує результати вище.

Зменшення питомого споживання енергії на опалення при застосуванні енергоефективних режимів знову є майже однаковою при порівнянні однакових режимів в різних кліматичних умовах (наприклад, в січні місяці модель в м. Київ показала зменшення на 0,78 та 1,39 кВт·год/м³ при застосуванні режиму 2 та 3 відповідно, а в м. Одеса 0,78 та 1,40 кВт·год/м³ для тих самих режимів.

В середньому відсоток ефективності переривчастого режиму опалення №2 складає 10 %, але в залежності від сезону він може коливатися від 6 % до 22 % для м. Київ та від 7 % до 26 % для м. Одеса. Режим №3 показує свою ефективність в середньорічному виразі на рівні 20 %, а в помісячному розрізі коливається від 7 % до 26 % для м. Київ та від 16 % до 40 % для м. Одеса.

В загальному, співвідношення відносної економії між будівлями в I та II кліматичних зонах відповідає отриманим в розрахунках вище, але цікавим моментом є різна відносна економія в залежності від місяця, який розглядається. Таке явище можна пояснити різними базовими рівнями споживання через різницю середньомісячних температур.

Наступним кроком було дослідити ефективність переривчастих режимів опалення при термомодернізації огорожувальних конструкцій, приведених до мінімальних норм для м. Києва згідно ДСТУ [5]. Аналіз також проводився для випадків розташування у двох кліматичних зонах.

Для цього в базову енергетичну модель для покращення поточного стану зовнішніх стін було додано шар утеплювача мінеральної вати товщиною 150 мм. Утеплення даху забезпечено додаванням шару мінеральної вати товщиною 200 мм. Вікна замінені на двокамерні з аргоновим наповнювачем для досягнення нормативного опору теплопередачі.

До таблиці 1 зведені дані щодо існуючого стану огорожувальних конструкцій будівлі, мінімальних нормативних вимог до утеплення будівлі та рівня опору теплопровідності з яким змодельована будівля для випадку «утеплена будівля».

Таблиця 1 – Опір теплопередачі зовнішніх огорожувальних конструкцій існуючої будівлі ($R_{існ}$), мінімальних нормативних вимог ($R_{норм}$) та опори які були використанні для моделювання утепленої будівлі ($R_{ут}$)

Вид огорожувальної конструкції	$R_{існ}$, м ² ·К/Вт	$R_{норм}$, м ² ·К/Вт	$R_{ут}$, м ² ·К/Вт
Зовнішні стінові огорожувальні конструкції	2,91	4,00	4,73
Покриття опалюваних горищ (технічних поверхів), мансард, горищні перекриття неопалюваних горищ	0,71	6,00	6,25
Світлопрозорі огорожувальні конструкції	0,61	0,90	0,90

За даними моделювання, при теплоізоляції будівлі розташованої в кліматичних умовах м. Київ, питоме споживання енергії на опалення було зменшено з 44,5 кВт·год/м³ до 40,1 кВт·год/м³ (покращення 9,9 %), а для будівлі в м. Одеса з 40,2 кВт·год/м³ до 36,1 кВт·год/м³ (покращення 10,3 %). Таким чином, теплоізоляція до нормативних вимог ізоляції будівель є майже однаково ефективним для розглянутої будівлі, незалежно від кліматичної зони в якій вона знаходиться. В загальному, результати моделювання підтверджують доцільність теплоізоляції будівель до нормативних умов.

Додатково, продовжуючи дослідження впливу енергоефективних режимів опалення на будівлі шкільних заходів що пройшли термомодернізацію, запропоновано також дослідити вплив енергоефективних режимів опалення в будівлях з механічною системою вентиляції.

Наявність механічної системи вентиляції в будівлі дозволяє регулювати надходження зовнішнього повітря. Надходження зовнішнього повітря в базову модель будівлі (за нормативами прийнята на рівні 1 год-1) [12]. При впровадженні енергоефективних режимів опалення, система вентиляції відмикається в той час коли в системі опалення впроваджується провал.

Результати питомого річного споживання енергії на опалення наведені на Рисунку 2.

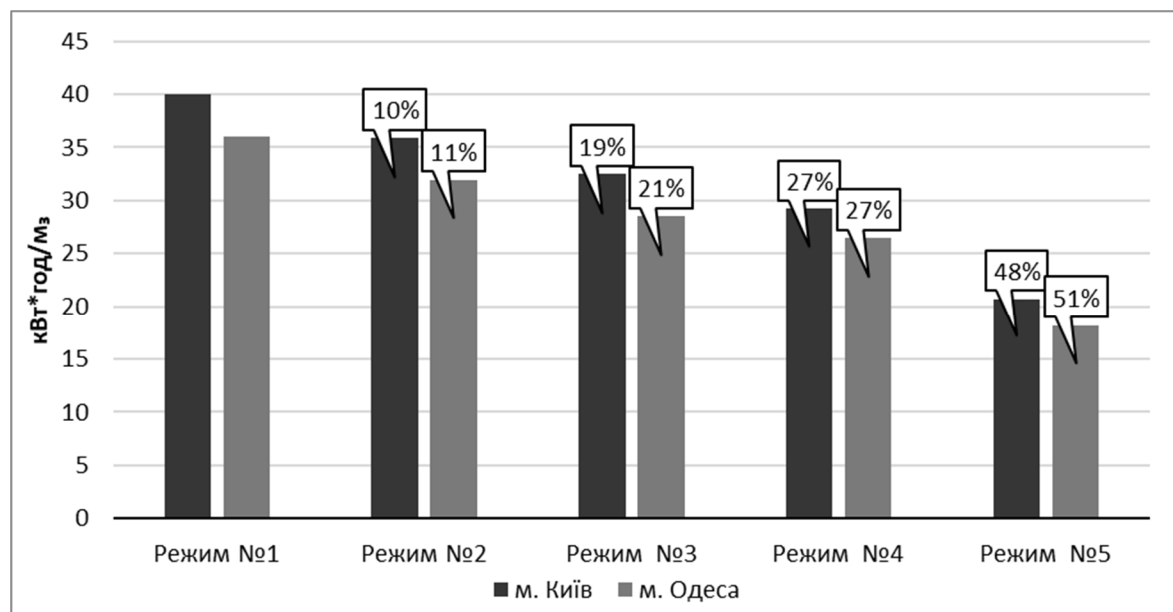


Рисунок 2 – Річне споживання енергії на опалення для будівлі розташованої в двох кліматичних зонах

За графіком, наведеним вище, застосування енергоефективних режимів опалення дозволило зменшити питоме споживання для випадку теплоізованої будівлі з $40 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ до $35,9 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ та $32,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ (10 % та 19 % економії) при використанні режимів №2 та №3 відповідно для I кліматичної зони, та з $36 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ до $32 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ та $28,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ (11 % та 21 % економії) для II кліматичної зони. А додавання переривчастих режимів на вентиляцію, тобто режими №4 та №5 дозволяє знизити енергоспоживання до $29,2 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ та $20,7 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ (27 % та 48 % економії) для I кліматичної зони, а для випадку II кліматичної зони знизити енергоспоживання до $26,4 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ та $18,2 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$, що становить 27 % та 51 % економії.

Моделювання енергоефективних режимів опалення для будівель з тепловою оболонкою доведених до нормативного значення I кліматичної зони [5] продемонструвало таке ж саме відносно до випадку без регулювання покращення енергоефективності. Це може бути пояснено тим, що при теплоізоляції будівлі пропорційно зменшилось базове споживання як будівлі без регулювання так і будівель з енергоефективними режимами опалення для випадків обох кліматичних зон.

Також, скорочення надходжень навколишнього повітря в будівлі на додаток до введення переривчастих режимів опалення дозволяє значно зменшити енергоспоживання будівлі не залежно від кліматичної зони в якій розташована будівля.

Оскільки масивність ізоляційних матеріалів є значно меншою за масивність несучих конструкцій (густина керамічної цегли – $1600 \text{ кг}/\text{м}^3$, а густина мінеральної вати – $30 \text{ кг}/\text{м}^3$ [5]), тобто масивність огорожень змінилась несуттєво. Досліджено вплив збільшення опору теплопередачі на коливання енергоспоживання системою опалення в випадках введення переривчастих режимів. Для цього, був проведений погодинний аналіз потреби на опалення в будівлі розташованої в м. Київ (рис. 3) та Одеса (рис. 4):

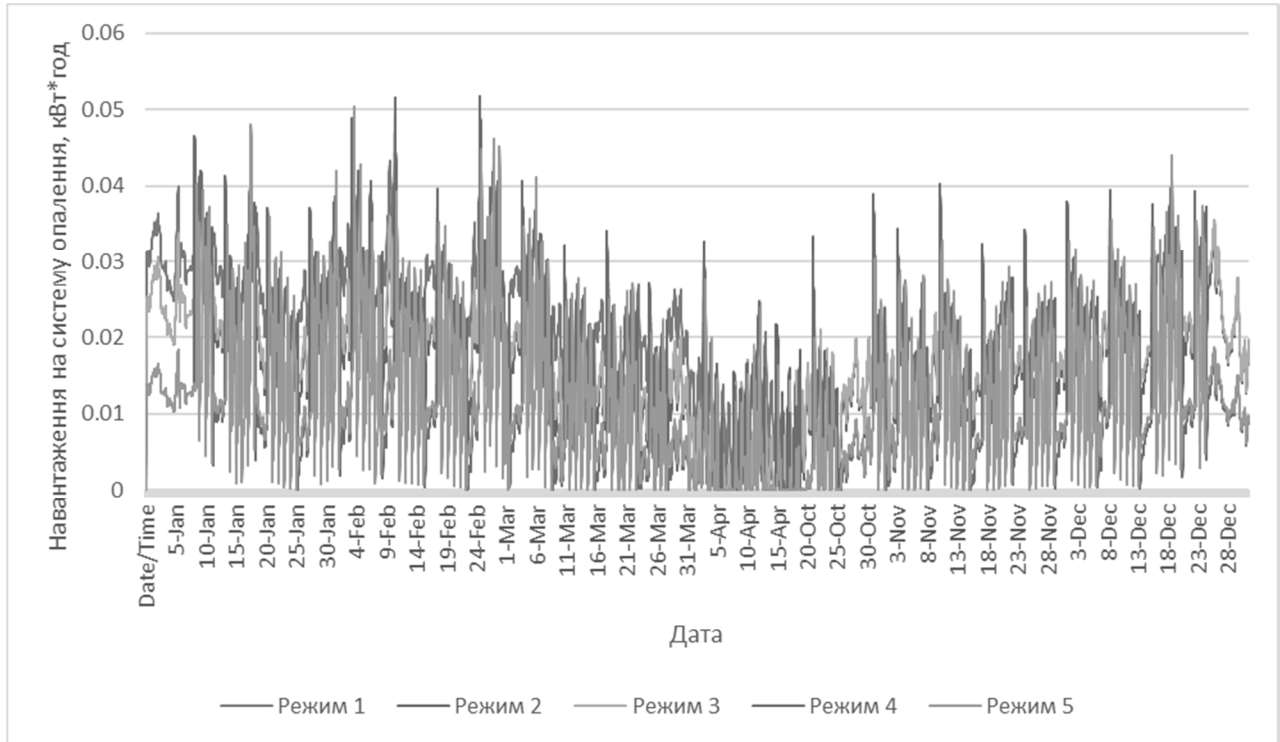


Рисунок 3 – Споживання енергії на потреби опалення, кВт·год утеплена будівля м. Київ

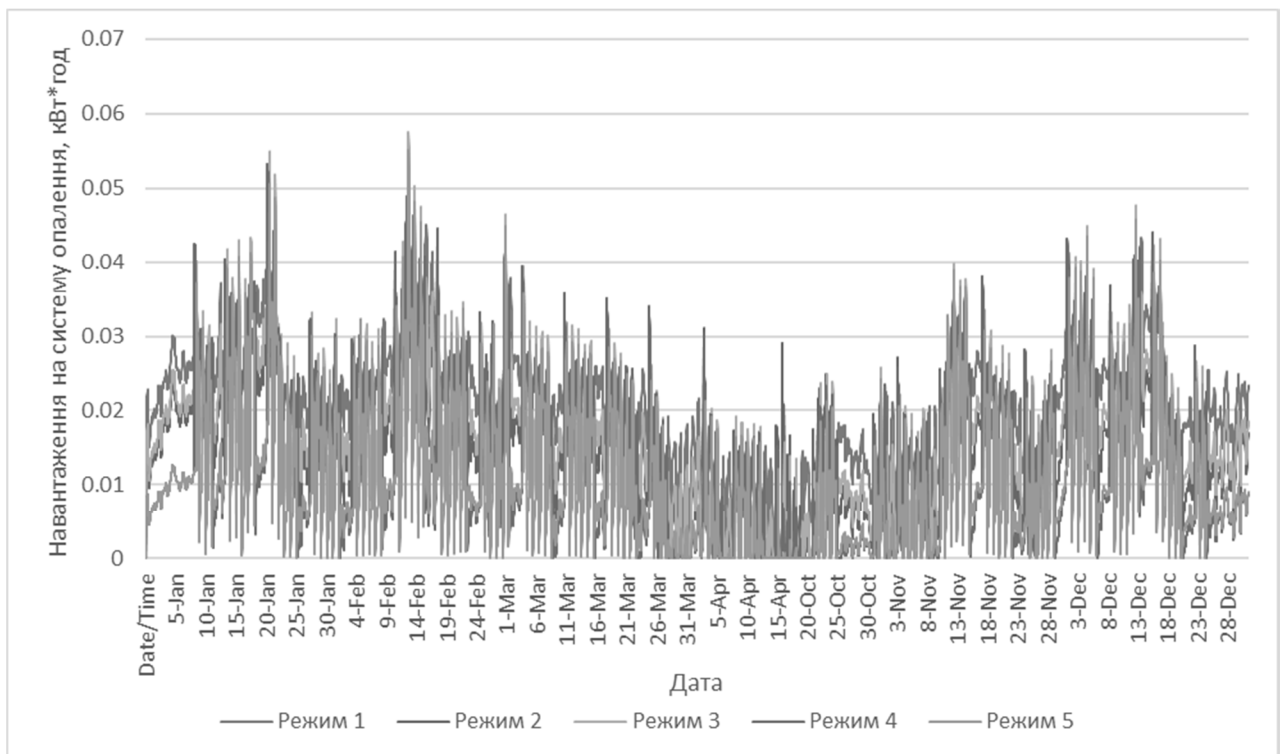


Рисунок 4 – Споживання енергії на потреби опалення, кВт·год утеплена будівля м. Одеса

Перехідні періоди в будівлях без утеплення в випадках введення режимів опалення (режими 2 та 3 рис. 3 та 4) характеризуються значними, в порівнянні з постійним режимом опалення, піками одночасно з меншим сумарним споживанням, що підтверджують отримані раніше результати. Найвище навантаження на систему опалення в I кліматичній зоні для режиму 1 складає 135846,81 Вт, а для режиму 2 167981,97 Вт та 166999,3 Вт для режиму 3. Для II кліматичної зони найвище навантаження складає 153986,31 Вт для режиму 1, 174926,41 Вт та режиму 2 та 176436,18 для режиму 3.

Аналіз погодинного споживання енергії на опалення в випадках термомодернізованої будівлі також показують характерне підвищення пікового споживання (й навантаження на систему опалення відповідно), проте, різниця зі споживанням для випадку постійного режиму опалення відчутно менша. У I кліматичній зоні режими 2 та 3 підвищують навантаження на систему опалення на 20,4 %, а у II кліматичній зоні на 9,3 % режим 2 та 12,7 % режим 3.

На рисунку 5 приведені результати теплового навантаження на систему опалення при впровадженні переривчастих режимів опалення.

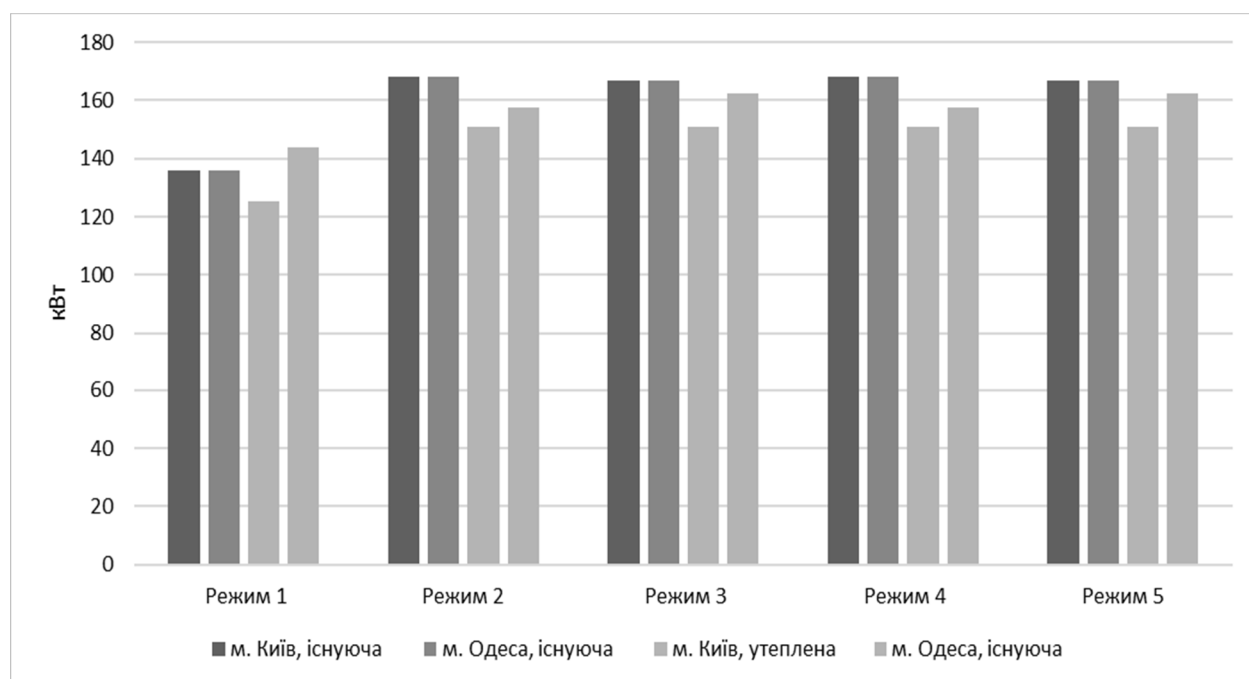


Рисунок 5 – Теплове навантаження на систему опалення для двох кліматичних зон

З даних можна зробити висновок, що для I кліматичної зони навантаження на систему опалення при впровадженні режиму 2 збільшується на 23,6 %, а для режиму 3 на 22,9 %, відносно режиму 1 з постійним графіком опалення. На цьому прикладі яскраво відображається момент підвищення температури опалення до комфортної, тобто підвищення температури при режимі 2 відбувається на початку доби, а отже вночі коли зовнішня температура доби зазвичай сягає найнижчого рівня, а для режиму 3 підвищення внутрішньої температури відбувається зранку, за годину до того як прийдуть учні та навчальний персонал, тобто в більш теплий період доби. Для випадку утепленої будівлі підвищення рівня навантаження становить 20,4 % для обох переривчастих режимів (режим 1 та режим 2) відносно постійного (режим 1). Для II кліматичної зони зберігаються такі ж тенденції, підвищення рівня навантаження на систему опалення при існуючому стані

будівлі 13,5 % для режиму 2 та 14,5 % для режиму 3. Для утепленої будівлі режим 2 показує на 9,3 % вище, а режим 3 на 12,7 % вище навантаження відносно режиму 1. При визначенні навантаження на систему опалення в розрахунку враховується найнижча зовнішня температура, та не враховується внутрішні та зовнішні (сонячні) теплонадходження. Найнижчий рівень зовнішньої температури, відповідно до погодинного погодного кліматичного файлу IWEC [8,9] становить $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ для Одеси, в той час як для Києва найнижча зовнішня температура сягає $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$. При розрахунку енергоспоживання на потреби опалення враховується зміна зовнішніх кліматичних умов (зовнішня температура, сонячні теплонадходження, тощо), внутрішні теплонадходження від освітлення, обладнання та людей відповідно до графіків експлуатації будівлі, а також теплозахисні та теплоінерційні особливості оболонки будівлі, тощо (рис. 2–4).

Такі показники свідчать, що попри зменшення споживання енергії будівлею, потужність системи опалення має бути більшою для забезпечення комфортних умов перебування дітей в приміщеннях. Для запобігання дискомфорту в перехідні періоди для дітей та вчителів. В досліджуваних моделях підвищення температури до нормативної [12], відбувається завчасно, а саме за годину до початку навчального процесу.

Одним з варіантів запобігання високих значень пікового навантаження на систему опалення є поступове підвищення температури завчасно до годин прибуття людей в приміщення (наприклад по $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ кожну годину за 3 години до початку навчання), що легко досягається введенням програмованого терморегулювання.

Це явище, а також підхід до «виходу» на нормативну температуру варто враховувати як при впровадженні графіків в існуючу будівлю так і при модернізації систем опалення.

Такі дані свідчать про те, що, за умов комплексної термомодернізації будівні, рішення про введення регульованого або програмованого опалення має бути прийнятим до етапу проектування системи опалення.

На базі будівлі що пройшла термомодернізацію огорожуючих конструкцій, використовує переривчастий режим опалення та вентиляції (режим 5) було розглянуто чотири конфігурації системи опалення з впровадженням ВДЕ:

- котел на біопаливі;
- сонячні панелі;
- тепловий насос;
- тепловий насос+ сонячні панелі.

Для моделювання системи опалення з використанням котла на біопаливі, представлена на рисунку 6, а в програмному середовищі DesignBuilder було обрано відповідну систему з запропонованої бібліотеки з коригуванням коефіцієнта корисної дії відповідно до реальних умов 91 % [13].

Враховуючи техніко-геометричні характеристики школи, локацією для розташування сонячних панелей було визначено південну сторону скатного даху, як показано на рисунку 6, б. Пропонується встановити систему сонячних панелей з під'єднанням до центральної електричної мережі, для компенсації фактору нестабільного потоку сонячної радіації впродовж року на території розташування школи. Габарити однієї панелі – $2333 \times 1134 \times 30$ см, номінальна потужність модуля – 565 Вт, коефіцієнт ефективності – 0,21.

Для моделювання системи опалення з тепловим насосом було обрано тип теплового насоса повітря-вода, середньосезонний коефіцієнт перетворення електричної енергії в теплову (COP) – 2,5 [13] система представлена на рисунку 6, в. Енергоспоживання

будівлі при впровадженні різних джерел енергозабезпечення наведені на рисунку 7. Існуючим джерелом теплозабезпечення будівлі є газова котельня. Відповідно до діючих стандартів [13] ефективність газового котла 0,81.

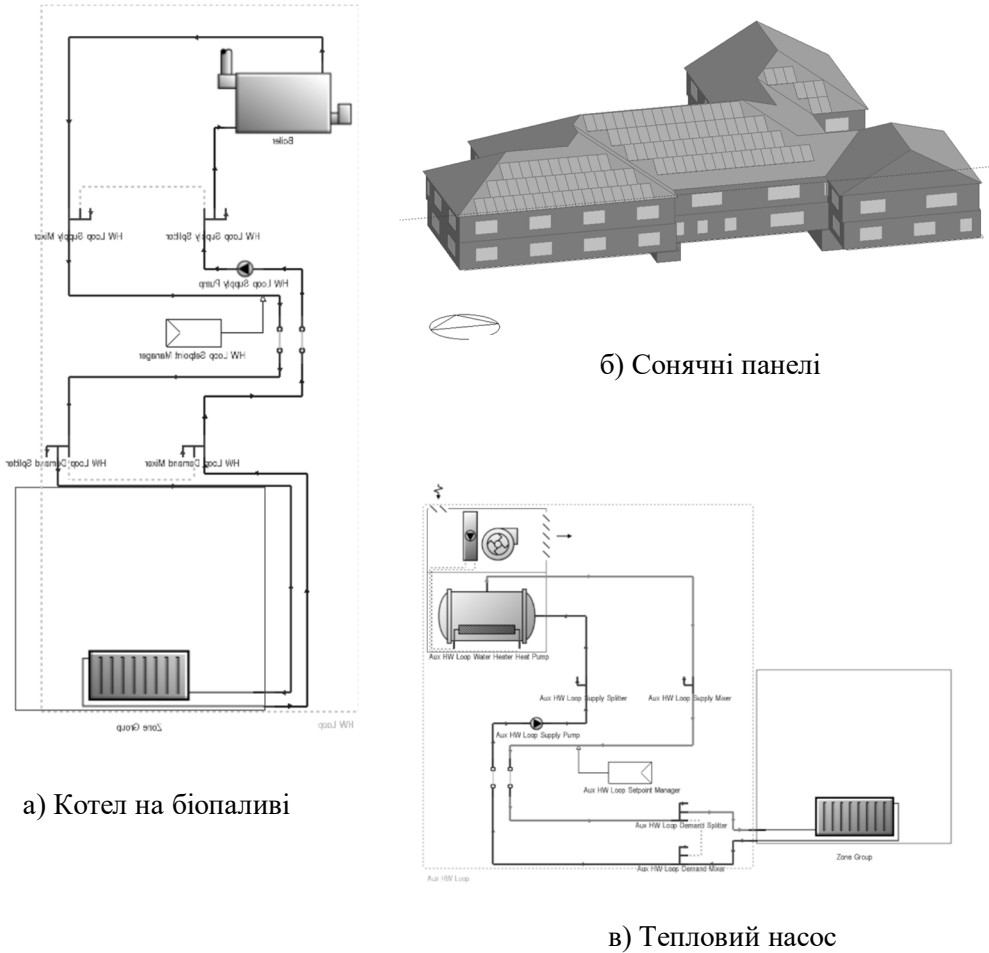


Рисунок 6 – Система опалення при впровадженні котлу на біопаливі в програмі DesignBuilder

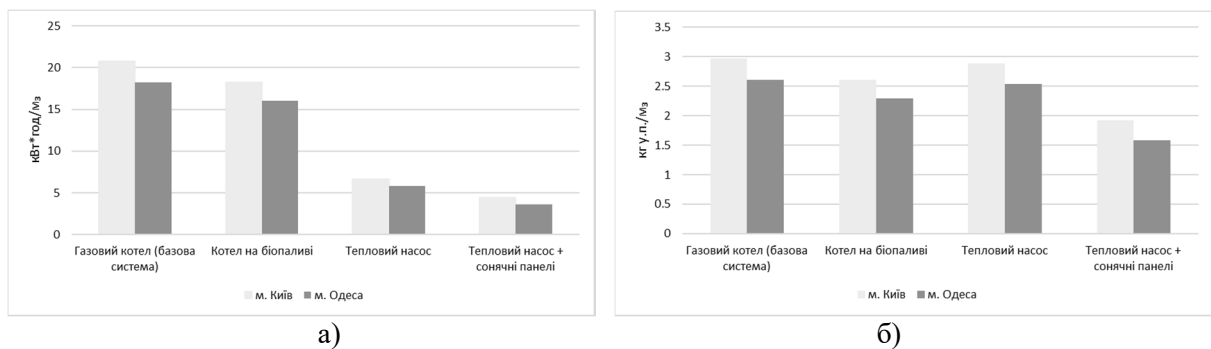


Рисунок 7 – Енергоспоживання на опалення для різних джерел енергозабезпечення: а) кінцеве споживання, б) первинне паливо

Згідно з результатів моделювання, котел на біопаливі показує найменше підвищення енергоефективності з трьох запропонованих, 2,5 кВт·год/м³ та 2,2 кВт·год/м³ (скорочення на 12% відносно базового рівня) в випадку м. Київ та Одеса відповідно, оскільки ККД котла значно нижчий за ефективність теплового насосу, що використовуються як основне джерело опалення в двох інших варіантів.

Впровадження сонячної панелі дозволило скоротити питоме споживання енергії на 2,21 кВт·год/м³ та 6,43 кВт·год/м³ для I та II кліматичних зон. Будівлі змогли досягти скорочення на 79 % та 80 % відносно покращеної базової моделі при впровадженні теплового насосу та сонячної панелі.

Завдяки впровадженню всіх покращень будівля скоротила споживання енергії на опалення на 90 %.

Також, для реального впливу на довкілля та споживання палива, був проведений аналіз споживання первинної енергії при модернізації системи опалення (рис. 7 б). Результати споживання по первинному паливу показують майже рівне питоме споживання для всіх запропонованих систем, тепловий насос лише на 2,7 % більш ефективний за газовий котел, та на 10,7 % менш ефективний за котел на біопаливі (для випадку м. Київ), що пояснюється низьким ККД виробництва електричної енергії в Україні, що в випадку Українських кліматичних умов не може бути покрито ефективністю теплового насосу повітря-вода.

Покращення відносно газового котлу показала система з впровадженою сонячною системою, оскільки згенерована електроенергія дозволила скоротити електроспоживання на опалення будівлі. Варто зазначити, що аналіз системи тепловий насос + сонячні панелі не є вичерпним, оскільки важко врахувати те, що більшість електроенергії виробляється саме в неопалювальний період.

Висновки. Впровадження режимів опалення за графіками дозволяє знизити енергоспоживання на опалення від 10 % до 20 % в залежності від режиму та кліматичної зони. Режим 3 є найбільш енергоефективним, але також найбільш складним для технічної реалізації. Ефект впровадження ефективного регулювання слабо залежить від кліматичної зони, а різницю в відносній економії можна пояснити меншим базовим рівнем питомого споживання в Одесі.

Виходячи з результатів у помісячного розрізі можна сказати, що у більш помірному кліматі енергоефективні режими опалення можуть показати ще вищий показник енергоефективності.

Регулювання системи вентиляції відповідно до переривчастих графіків опалення дозволяє зекономити 18 % для режиму №4, та 36 % для режиму №5, дані показники є однаковими для обох кліматичних зон, що обумовлює високий показник ефективності впровадження для усі регіонів України.

З результатів моделювання випливає, що найбільш енергоефективним є варіант з тепловим насосом та сонячною панеллю, який дозволяє знизити енергоспоживання на опалення на 79–80 % в різних кліматичних зонах. Варіант з котлом на біопаливі є найменш енергоефективним, оскільки ККД котла нижчий за ефективність теплового насосу. Впровадження всіх покращень дозволяє скоротити енергоспоживання на опалення на

90 %. Проте, система з тепловим насосом не є так само ефективною якщо проводити аналіз з точки зору споживання первинної енергії.

В подальшому пропонується дослідити використання теплових насосів вода-вода та ґрунт-вода а також їх комбінації з відновлювальними джерелами на споживання первинної енергії в будівлях дошкільної освіти.

Література

1. Оцінка економічної ефективності використання відновлювальних джерел енергії в освітніх установах / О.М. Ковальов, О.О. Ковальова, О.В. Черненко, О.О. Черненко // Економіка та організація управління. – 2021. – № 2 (32). – С. 67–76.

2. Енергоефективність переривчастих режимів опалення будівель з різними теплофізичними характеристиками огорожувальних конструкцій / О.В. Дешко, І.Ю. Білоус, Н.А. Буяк, О.В. Петрученко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Машинобудування. – 2021. – № 2. – С. 32–41.

3. Стандарт ASHRAE Електронний ресурс] <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-90-1>.

4. Будівельна кліматологія: ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 с. 42.

5. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель / ДБН В.2.6-31:2021 [Національний стандарт України] – К.: Мінрегіон України, 2022, – 7 с.

6. "Офіційний сайт DesignBuilder". Доступно онлайн: <https://designbuilder.co.uk/>.

7. "Офіційний сайт EnergyPlus". Доступно онлайн: <https://energyplus.net/>.

8. International Weather for Energy Calculations Kyiv: [Електронний ресурс] https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR/UKR_Kiev.333450 IWEC.

9. International Weather for Energy Calculations Odesa: [Електронний ресурс] https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR/UKR_Odessa.338370 IWEC.

10. Офіційний сайт RETScreen [Електронний ресурс] <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>.

11. Білоус І.Ю., Дешко В.І., Буяк Н.А., Петрученко О.В. Аналіз впливу енергоефективних режимів опалення на енергоспоживання будівель на основі математичного моделювання. Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». 2021. №4. С. 32–42.

12. Будинки і споруди. Заклади освіти /ДБН В.2.2-3:2018// [Національний стандарт України] – К.: Мінрегіон України, 2018, – 11с.

13. ДСТУ 9190:2022 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання / Держспоживстандарт України // № 2. – С. 32–41.

Bibliography (transliterated)

1. Otsinka ekonomichnoyi efektyvnosti vykorystannya vidnovlyuval'nykh dzherel enerhiyi v osvitnikh ustanovakh / O.M. Koval'ov, O.O. Koval'ova, O.V. Chernenko, O.O. Chernenko // Ekonomika ta orhanizatsiya upravlinnya. – 2021. – № 2 (32). – P. 67–76.

2. Enerhoefektyvnist' pereryvchastykh rezhymiv opalennya budivel' z riznymy teplofizychnymy kharakterystykamy ohorodzhuval'nykh konstruktsiy / O.V. Dshko, I.YU. Bilous, N.A. Buyak, O.V. Petruchenko // Visnyk NTUU «KPI». Seriya: Mashynobuduvannya. – 2021. – № 2. – P. 32–41.
3. Standart ASHRAE Elektronnyy resurs] <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-90-1>.
4. Budivel'na klimatolohiya: DSTU-N B V.1.1-27:2010 p. 42.
5. Teplova izolyatsiya ta enerhoefektyvnist' budivel' / DBN V.2.6-31:2021 [Natsional'nyy standart Ukrayiny] – K.: Minrehion Ukrayiny, 2022, – 7 p.
6. "Official DesignBuilder Website." Available online: : <https://designbuilder.co.uk/>.
7. "Official EnergyPlus Website." Available online: <https://energyplus.net/>.
8. International Weather for Energy Calculations Kyiv: Available online https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR/UKR_Kiev.333450_IWEC.
9. International Weather for Energy Calculations Odesa: Available online https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR/UKR_Odesa.338370_IWEC.
10. Ofitsiyyny sayt RETScreen [Elektronnyy resurs] <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>.
11. Bilous I.YU., Dshko V.I., Buyak N.A., Petruchenko O.V. Analiz vplyvu enerhoefektyvnykh rezhymiv opalennya na enerhospozhyvannya budivel' na osnovi matematychnoho modelyuvannya. Naukovyy zhurnal «Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya». 2021. №4. С. 32–42.
12. Budynky i sporudy. Zaklady osvity /DBN V.2.2-3:2018// [Natsional'nyy standart Ukrayiny] – K.: Minrehion Ukrayiny, 2018, – 11 p.
13. DSTU 9190:2022 Enerhetychna efektyvnist' budivel'. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannya pid chas opalennya, okholodzhennya, ventylyatsiyi, osvitlennya ta haryachoho vodopostachannya / Derzhspozhyvstandart Ukrayiny // № 2. – P. 32–41.

УДК 621

В. І. Дешко^{1,2}, д-р техн. наук, проф., І. Ю. Білоус^{1,3}, канд. техн. наук, доцент,
О. О. Голубенко¹, аспірант, П. Ю. Сердечний¹, аспірант, Н. А. Яркова¹, магістр

ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ШКОЛИ З ВРАХУВАННЯМ ЛОКАЛЬНИХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Енергоефективність є однією з ключових тем, що стали дуже актуальними в останні роки. В будівлях, як кінцеві споживачі енергії, зосереджений найбільший потенціал енергозбереження. І водночас, важливою складовою енергоефективності є оптимальне використання енергоресурсів, де лівова частка припадає на споживання теплової енергії. В цьому контексті, графіки чергування опалення стають важливим інструментом для досягнення цієї мети. У даній статті автори досліджують енергоефективність різних

режимів опалення та вентиляції для школи розташованої в двох кліматичних зонах України: I (Київ) та II (Одеса). Використовуючи програмне забезпечення DesignBuilder, яке базується на моделі EnergyPlus, автори моделюють п'ять переривчастих режимів для системи опалення та вентиляції. Автори також порівнюють енергоефективність різних джерел тепла: котел на біопаливі, тепловий насос та сонячна панель. Виявлено, що впровадження режимів опалення за графіками дозволяє знизити енергоспоживання на опалення від 10 % до 20 % в залежності від режиму та кліматичної зони, а використання відновлювальних джерел енергії на базі впровадження переривчастих режимів опалення та вентиляції для школи показує ефективність на 79 %-80 %. Автори також аналізують вплив термомодернізації огорожуючих конструкцій на енергоефективність будівель. Висновок щодо введення переривчастих режимів опалення для неутеплених будівель є надзвичайно ефективним заходом з енергозбереження, а вплив заходу на енергозбереження будівлі буде відчутним й після теплосонації. Впровадження всіх покращень дозволяє скоротити енергоспоживання на опалення на 90 %.

Ключові слова: енергоефективність, опалення, вентиляція, тепловий насос, сонячна панель, DesignBuilder, EnergyPlus.

В. И. Дешко, д-р техн. наук, проф., И. Ю. Белоус, канд. техн. наук, доцент,
А. А. Голубенко, аспирант, П. Ю. Сердечный, аспирант, Н. А. Яркова, магистр

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ШКОЛЫ С УЧЕТОМ ЛОКАЛЬНЫХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Энергоэффективность является одной из ключевых тем, которая стала очень актуальной в последние годы. В зданиях, как конечных потребителях энергии, сосредоточен наибольший потенциал энергосбережения. В то же время, важной составляющей энергоэффективности является оптимальное использование энергоресурсов, где основная часть приходится на потребление тепловой энергии. В этом контексте, графики чередования отопления становятся важным инструментом для достижения этой цели. В данной статье авторы исследуют энергоэффективность различных режимов отопления и вентиляции для школы, расположенной в двух климатических зонах Украины: I (Киев) и II (Одесса). Используя программное обеспечение DesignBuilder, базирующееся на модели EnergyPlus, авторы моделируют пять прерывистых режимов для системы отопления и вентиляции. Авторы также сравнивают энергоэффективность различных источников тепла: котел на биотопливе, тепловой насос и солнечную панель. Выявлено, что внедрение режимов отопления по графикам позволяет снизить энергопотребление на отопление от 10 % до 20 % в зависимости от режима и климатической зоны, а использование возобновляемых источников энергии на основе внедрения прерывистых режимов отопления и вентиляции для школы показывает эффективность на 79 %-80 %. Авторы также анализируют влияние термомодернизации ограждающих конструкций на энергоэффективность зданий. Вывод о введении прерывистых режимов отопления для неутепленных зданий является чрезвычайно эффективной мерой энергосбережения, а влияние меры на энергосбережение здания будет ощутимым и после теплосанації. Внедрение всех улучшений позволяет сократить энергопотребление на отопление на 90 %.

Ключевые слова: энергоэффективность, отопление, вентиляция, тепловой насос, солнечная панель, DesignBuilder, EnergyPlus.

V. Deshko, I. Bilous, O. Holubenko, P. Serdechnyi, N. Yarkova

**ASSESSMENT OF THE LEVEL OF ENERGY EFFICIENCY OF A SCHOOL
TAKING INTO ACCOUNT THE USE OF LOCAL RENEWABLE ENERGY
SOURCES**

Energy efficiency is one of the key topics that have become very relevant in recent years. In buildings, as the final consumers of energy, the greatest potential for energy saving is concentrated. And at the same time, an important component of energy efficiency is the optimal use of energy resources, where the lion's share falls on the consumption of thermal energy. In this context, heating schedules become an important tool for achieving this goal. In this article, the authors investigate the energy efficiency of different heating and ventilation modes for a school located in two climatic zones of Ukraine: I (Kyiv) and II (Odesa). Using the DesignBuilder software, which is based on the EnergyPlus model, the authors model five intermittent modes for the heating and ventilation system. The authors also compare the energy efficiency of different heat sources: a boiler on biofuel, a heat pump and a solar panel. It was found that the introduction of heating modes according to the schedules allows to reduce energy consumption for heating by 10 % to 20 % depending on the mode and climatic zone, and the use of renewable energy sources based on the introduction of intermittent heating and ventilation modes for the school shows efficiency at 79 %-80 %. The authors also analyze the impact of thermomodernization of enclosing structures on the energy efficiency of buildings. The conclusion on the introduction of intermittent heating modes for non-insulated buildings is an extremely effective measure for energy saving, and the impact of the measure on energy saving of the building will be noticeable even after thermal insulation. The implementation of all improvements allows to reduce energy consumption for heating by 90 %.

Keywords: energy efficiency, heating, ventilation, heat pump, solar panel, DesignBuilder, EnergyPlus.