

В. І. Дешко, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8218-3933
І.Ю. Білоус, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6640-103X
Н.А. Буяк, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-0597-6945
О.В. Петрученко, ORCID 0000-0002-4982-4217
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ ОПАЛЕННЯ НА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Світові тенденції підвищення рівня енергетичної ефективності будівель спрямовані на зменшення споживання енергії до майже нульового споживання (nZEB). Для досягнення рівня nZEB потрібне впровадження комплексу енергозберігаючих заходів з покращення теплофізичних властивостей огорожень, інженерних систем будівлі та використання відновлювальних джерел енергії. Одним з малозатратних та енергоефективних заходів з підвищення рівня енергетичної ефективності будівель є впровадження енергоефективних переривчастих режимів опалення будівель. Зазвичай, даний захід є доцільним та можливим після термомодернізації будівлі. Визначення енергетичних характеристик будівель за впровадження переривчастих режимів опалення потребує використання математичних моделей. В роботі проведено порівняння застосування різних математичних моделей та методів для оцінки економії теплової енергії при термомодернізації та впровадженні переривчастих режимів опалення. Розрахунок проведений для житлової будівлі та гімназії, розташованої в місті Києві. Впровадження комплексу заходів з термомодернізації огорожень будівель дозволить зменшити споживання теплової енергії на 60 та 35% для ЖБ та гімназії, відповідно. Впровадження переривчастих режимів опалення для будівель після термомодернізації сучасних будівель дозволяє заощадити на опаленні понад 15% - визначено на основі програми RETScreen, 10% - на основі динамічної сіткової моделі 5RIC, 22% - на основі квазістаціонарного методу, за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015, для житлового будинку та будівлі гімназії, розташованих в м. Київ.

Ключові слова: математичне моделювання, будівлі, переривчасті режими опалення, енергозбереження.

Вступ

Будівельний сектор європейських країн все більше орієнтується на майже нульове споживання енергії, відповідно до директиви ЄС про енергетичну ефективність будівель 2010/31/EU (Energy Performance of Buildings Directive — EPBD) [1]. В Україні, як і в інших країнах світу, що приєдналися до цієї директиви, проводиться активна політика щодо підвищення рівня енергетичної ефективності житлово-комунального сектору. Покращення теплозахисних властивостей огорожень будівель є першими кроками на шляху до будівель з майже нульовим споживанням енергії (nZEB) [2]. Для оцінки мінімальних вимог до рівня енергоефективності міжнародні стандарти регулярно змінюються та вдосконалюються/деталізуються, Україна адаптує внутрішні стандарти в руслі змін міжнародних.

В Україні переважна більшість будівель зведена в період масової забудови, для яких характерний низький рівень теплозахисних властивостей огорожень. Аналогічна ситуація в країнах пострадянського простору та країнах Східної Європи, наприклад Польщі. В Україні кожні 5 років переглядають мінімальні допустимі вимоги для досягнення рівня енергоефективності будівель, наприклад, в Польщі ці показники переглядаються кожні 3 роки [3]. З 2014 року до 2021 року вимоги до теплозахисних властивостей будівель в середньому підвищилися до 10% в Україні та 35% – в Польщі, а саме зовнішні стіни – 0% та 25%, вікна – 0% та 44%, горищене перекриття – 10% та 33%, вхідні двері – 20% та 30%, відповідно до стандартів України (рис. 1,а) та Польщі (рис. 1,б) [3-5]. Враховуючи світові тенденції, щодо доведення будівель до nZEB, Україні потрібно розробити національні критерії щодо оцінки та підвищення рівня енергетичної ефективності будівель.

На даний час при підвищенні рівня енергоефективності існуючого фонду будівель в Україні активно впроваджуються енергозберігаючі заходи з покращення теплофізичних властивостей оболонки будівель та покращення роботи інженерних мереж з впровадженням енергоефективних режимів опалення. Впровадження енергоефективних/розумних режимів опалення будівель є невід'ємною складовою стратегій переходу країни від енергоефективності до енергонезалежності [6].

© В. І. Дешко, І.Ю. Білоус, Н.А. Буяк, О.В. Петрученко, 2020

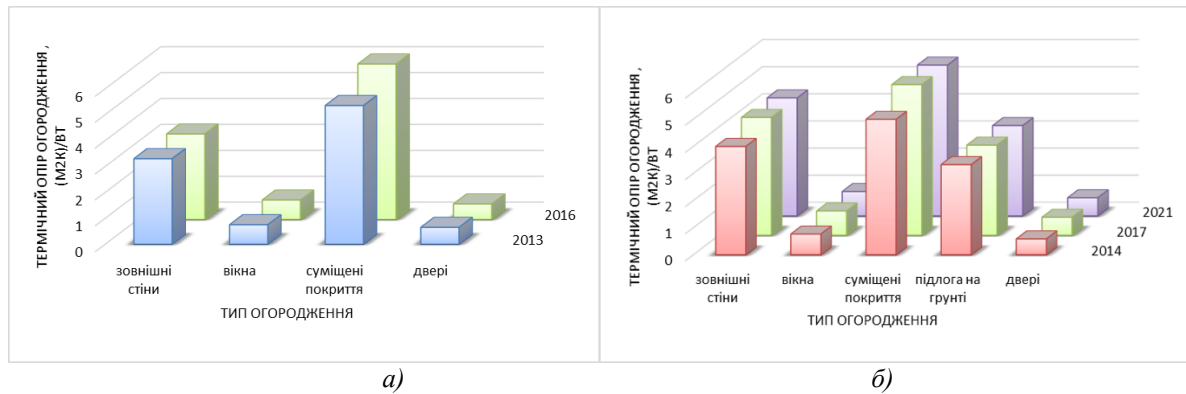


Рисунок 1 – Мінімальний термічний опір огорожень будівлі в Україні (а) та Польщі (б)

Мінімально допустимі вимоги до енергоефективності будівель з часом стають все вищими, а отже для їх виконання не достатнім є впровадження заходів зі зменшення трансмісійної складової втрат теплоти будівлі, необхідно приділяти більшу увагу системам теплозабезпечення будівель, їх керуванню, враховуючи експлуатаційні вимоги, поведінку та потреби користувачів. Для аналізу економічного ефекту від впровадження переривчастих режимів опалення необхідно використовувати математичні моделі для аналізу енергетичних та комфортних показників будівель. В Україні діє стандарт щодо оцінки енергетичної ефективності будівель ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [7], в якому регламентовано укрупнений підхід до оцінки переривчастих режимів опалення. Стандарт [7] проводить розрахунок для помісячних інтервалів, враховує лише графік зміни температури внутрішнього повітря в часі та не враховує теплоаккумуляційні властивості внутрішніх огорожень, радіаційну температуру поверхонь огорожень, добові коливання зовнішньої погодних умов та інше.

Річна енергопотреба будинку в теплі та/або охолодженні визначається за методикою [7]:

$$Q_o^{pik} = \sum_{i=1}^n Q_{HC.nd.i} \quad (1)$$

i – порядковий номер опалювального місяця;

n – кількість опалювальних місяців;

$Q_{HC.nd}$ – місячна енергопотреба для опалення або кондиціонування, Вт·год.

$$Q_{HC.nd} = Q_{HC.tr} + \eta_{HC.gn} Q_{HC.gn} \quad (2)$$

$Q_{HC.tr}$ – місячна сумарна теплопередача трансмісією та вентиляцією, Вт·год;

$Q_{HC.gn}$ – місячні сумарні теплонадходження в режимі опалення, Вт·год;

$\eta_{HC.gn}$ – безрозмірний місячний коефіцієнт використання надходжень.

$$Q_{HC.hr} = Q_{tr} + Q_{ve} \quad (3)$$

Q_{tr} – теплопередача трансмісією по місяцям, Вт·год;

Q_{ve} – теплопередача вентиляцією, кВт·год.

$$Q_{HC.gn} = Q_{int} + Q_{sol} \quad (4)$$

Q_{int} – сума внутрішніх теплонадходжень протягом даного періоду, Вт·год;

Q_{sol} – сума сонячних теплонадходжень протягом даного періоду, Вт·год.

$$Q_{tr} = H_{nr}(\theta_{int} - \theta_e)t, \quad (5)$$

H_{nr} – провідність трансмісією зони, Вт/К;

θ_{int} – задана температура зони будівлі для опалення, °С;

θ_e – середньомісячна температура зовнішнього середовища, °С;

t – тривалість місяцю для якого проводиться розрахунок, год.

$$Q_{ve} = H_{ve}(\theta_{int} - \theta_e)t, \quad (6)$$

H_{ve} – провідність вентиляцією, Вт/К.

Коригування для переривчастого режиму опалення

$$Q_{HC.nd,interm} = \alpha_{HC.red} Q_{HC.nd,cont} \quad (7)$$

$Q_{HC.nd,cont}$ – енергопотреба для постійного опалення, кВт·год,

$\alpha_{HC.red}$ – безрозмірний понижувальний коефіцієнт для переривчастого режиму опалення,

$$\alpha_{HC.red} = 1 - b_{HC.red} \left(\frac{\tau_{H,0}}{\tau} \right) \gamma_H (1 - f_{H.hr}) \quad (8)$$

$b_{HC.red}$ – емпіричний коефіцієнт кореляції, $b_{HC.red} = 3$,

$\tau_{H,0}$ – довідкова часова константа для режиму опалення, $\tau_{H,0} = 15$ год,

τ – часова константа зони будівлі, год,

γ_H – безрозмірне співвідношення надходжень і втрат теплоти для режиму опалення,

$f_{n,hr}$ – частка кількості годин на тиждень з нормальним (постійним) заданим режимом опалення.

$$\tau = C_m / (H_{hr} + H_{ve}) \quad (9)$$

C_m – внутрішня теплоємність будівлі, Вт·год/К.

На сьогодні існує ряд програмних комплексів для визначення енергоспоживання будівель на основі стаціонарних, квазістаціонарних та динамічних методів. Найбільш деталізованими та наближеними до реальних умов є динамічні моделі для визначення енергетичних характеристик будівель [8]. В Україні прийнято стандарт, який наводить методику розрахунку енергопотреб на базі динамічного погодинного методу розрахунку [9]. В основі – динамічна сіткова модель 5R1C [8, 9], на базі стандартів EN ISO 13790 та EN 13786 [10]. Математична модель 5R1C дозволяє проводити погодинний розрахунок енергетичних характеристик будівель, враховувати показники комфорту з урахуванням теплоаккумуляційних властивостей внутрішніх та зовнішніх огорожень, мінливості погодно-кліматичних умов, графіку використання приміщень та інше. Використання моделі потребує написання або використання існуючих програм для реалізації даного методу. Схема реалізації моделі наведена на рис. 2, що включає зовнішні стіни, віконні отвори та вентиляцію, які характеризуються в схемі блоками провідності H_{op} , $H_{tr,w}$, H_{ve} , відповідно.

Енергопотреба знаходяться за розрахунком потужності опалення чи охолодження для кожної години, $\Phi_{HC,nd}$, що повинна бути надана до, або відібрана з вузла температури внутрішнього повітря, θ_{air} , для підтримування певної мінімальної або максимальної заданої температури. Задана температура є середньозваженою за температурою повітря та середньою радіаційною температурою.

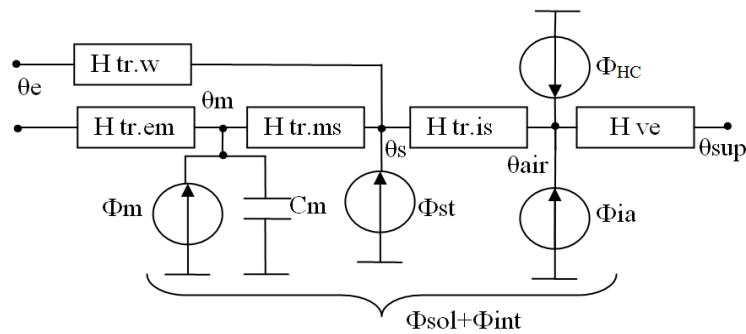


Рисунок 2 – Модель п'ять опорів, одна ємність (5R1C) [11]

Провідність через вентиляцію, H_{ve} , прямо пов'язана з вузлом температури внутрішнього повітря, θ_{air} , та вузлом, що відображає температуру припливного повітря, θ_{sup} . Провідність трансмісією поділяється на частину через світлопрозорі отвори, $H_{tr,w}$, що приймається з нульовою тепловою масою, та через непрозорі елементи зовнішніх огорожень H_{op} , що має тепловою масою, яка, в свою чергу, поділяється між двома блоками: сполучення провідністю між вузлами m та зовнішнім середовищем, $H_{tr,em}$, та сполучення провідністю між вузлами m та s , $H_{tr,ms}$. Сонячні та внутрішні теплові надходження розподіляються між вузлом температури внутрішнього повітря, θ_{air} , центральним вузлом, θ_s (суміш θ_{air} та середньої радіаційної температури θ_r) та вузлом, що представляє масив зони будівлі, θ_m . Теплова маса відображується теплоємністю, C_m , визначеною між $H_{tr,ms}$ та $H_{tr,em}$. Сполучення провідністю визначається між вузлом температури внутрішнього повітря та центральним вузлом. Величина теплового потоку за рахунок внутрішніх джерел, Φ_{int} , та величина теплового потоку в зону кімнати за рахунок сонця, Φ_{sol} , поділені між трьома вузлами: температури внутрішнього повітря, θ_{air} , та внутрішніми вузлами, θ_s , θ_m . Дана схема реалізована на базі стандартів EN ISO 13790, EN 13786 [11].

$$H_{tr,is} = h_{is} A_{tot} \quad (10)$$

$$H_{tr,ms} = h_{ms} A_m \quad (11)$$

$$H_{tr,em} = \frac{1}{\frac{1}{H_{op}} + \frac{1}{H_{tr,ms}}} \quad (12)$$

$$H_{tr,1} = \frac{1}{\frac{1}{H_{ve}} + \frac{1}{H_{tr,is}}} \quad (13)$$

$$H_{tr,2} = H_{tr,1} + H_{tr,w} \quad (14)$$

$$H_{tr,3} = \frac{1}{\frac{1}{H_{tr,2}} + \frac{1}{H_{tr,ms}}} \quad (15)$$

$$C_m = \sum k_j A_j \quad (16)$$

$$\Phi_{m,tot} = \Phi_m + H_{tr,em}\theta_e + \frac{H_{tr,3}(\Phi_{st} + H_{tr,w}\theta_e + H_{tr,1}(\frac{\Phi_{ia} + \Phi_{HC,nd} + \theta_{sup}}{H_{ve}}))}{H_{tr,2}} \quad (17)$$

$$\theta_m = \frac{\theta_{m,t} + \theta_{m,t-1}}{2} \quad (18)$$

$$\theta_{m,t} = \frac{\theta_{m,t-1}(\frac{C_m}{3600} - 0,5(H_{tr,3} + H_{tr,em})) + \Phi_{m,tot}}{\frac{C_m}{3600} + 0,5(H_{tr,3} + H_{tr,em})} \quad (19)$$

$$\theta_s = \frac{H_{tr,ms}\theta_m + \Phi_{st} + H_{tr,w}\theta_e + H_{tr,1}(\frac{\Phi_{ia} + \Phi_{HC,nd} + \theta_{sup}}{H_{ve}})}{H_{tr,ms} + H_{tr,w} + H_{tr,1}} \quad (20)$$

$$\theta_{air} = \frac{H_{tr,is}\theta_s + H_{ve}\theta_{sup} + \Phi_{ia} + \Phi_{HC,nd}}{H_{tr,is} + H_{ve}} \quad (21)$$

$\Phi_{ia}, \Phi_m, \Phi_{st}$ – внутрішні тепловиділення та сонячні тепло надходження, які діляться між 3-ма вузлами, $\theta_{air}, \theta_s, \theta_m$;

$\Phi_{m,tot}$ – загальний тепловий потік, Вт;

h_{is} – коефіцієнт теплопередачі між вузлом температури внутрішнього повітря, θ_{air} , та центральним вузлом, θ_s , з фіксованим значенням $h_{is} = 3,45 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$;

h_{ms} – коефіцієнт теплопередачі між вузлами m та s, з фіксованим значенням $h_{ms} = 9,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$;

A_m – ефективна масова площа, м²;

A_j – площа j-го елемента огорожень, м²;

A_{tot} – площа всіх зовнішніх огорожень зони будівлі, м²;

C_m – внутрішня теплоємність, Дж/К;

k_j – внутрішня теплоємність на одиницю площі j-го елемента будівлі, Дж/(м²·К);

$H_{tr,is}$ – сполучення провідністю між вузлами s та внутрішнім повітрям, Вт/К;

$H_{tr,1}, H_{tr,2}, H_{tr,3}$ – провідність умовних вузлів 1, 2, 3, Вт/м.

На практиці для оцінки доцільності впровадження енергозберігаючих заходів використовують програмне забезпечення RETScreen [12], яке дозволяє провести аналіз і визначити енергетичну, екологічну і фінансову доцільність енергозберігаючих проектів реновації будівель. Програмне забезпечення може бути використане для оцінки проектів, що включають різні заходи з підвищення енергоефективності, пов'язаних з огорожувальною конструкцією будівель, вентиляцією, освітленням, електрообладнанням, гарячим водопостачанням, насосами, вентиляторами, двигунами, процесами з використанням електроенергії, технологічної теплоти, технологічної пари, рекуперацією енергії, а також оцінити втрати тепла (пари), стисненого повітря тощо. Такий підхід є корисним як для нового будівництва, так і для модернізації будівель. Програма передбачає можливості як для комплексного моделювання об'єктів, так і надає можливість вивчати окремі зони, підсистеми або квартири.

З наведеного огляду слідує, що кожна з моделей має свої особливості і доцільним є порівняння використання різних математичних моделей для оцінки потенціалу енергозбереження шляхом впровадження комплексу енергозберігаючих заходів щодо покращення огорожень будівлі та впровадження переривчастих режимів опалення.

Мета та завдання

Метою роботи є дослідження переривчастих режимів опалення для будівель різного призначення після термомодернізації.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1) розрахунок потенціалу від впровадження комплексу заходів, щодо покращення теплофізичних властивостей огорожень.

2) створення енергетичної квазістаціонарної моделі будівлі для дослідження переривчастих режимів опалення;

3) створення сіткової динамічної енергетичної моделі будівлі для дослідження переривчастих режимів опалення;

4) Порівняльний аналіз використання переривчастих режимів опалення визначеного на основі різних підходів для різного призначення приміщень.

Матеріал та результати досліджень

Вихідні дані.

Об'єктами дослідження обрано:

1) 5 поверхова житлова будівля (ЖБ), 60 квартир, 1961 року побудови, Опалювальний об'єм будівлі – 7802,7 м³, опалювальна площа – 2737,8 м².

2) 2 поверхова будівля гімназії 1926 року побудови, де навчається 85 учнів. Опалювальний об'єм будівлі – 2324 м³, опалювальна площа – 774,6 м².

Будівлі розташовані в місті Київ. В будівлях проведена часткова заміна вікон, непрозорі елементи огорожень відповідають теплофізичним властивостям огорожень років забудови.

Таблиця 1 – Термічний опір огорожень будівель

вид огороження	Існуючий стан		Після термомдернізації	
	гімназія	ЖБ	гімназія	ЖБ
	Термічний опір огорожень, м ² К/Вт			
зовнішні стіни	0,9	0,7	3,3	3,56
вікна	0,34	0,5*	0,93	0,8
дах	1,97	1,13	4,95	4,95
підлога	0,5	2	2	5
двері	0,35	0,35	0,6	0,6

* - частково проведена заміна вікон

В роботі проведено розрахунок впровадження комплексу енергозберігаючих заходів по покращенню теплофізичних характеристик огорожень та впровадженню енергоефективних режимів опалення на основі квазістаціонарної моделі за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [7], стаціонарної моделі створеної на базі програмного продукту RETScreen [12] та динамічної моделі 5R1C за стандартами EN ISO 13790 та EN 13786 [11].

Комплекс енергозберігаючих заходів по покращенню теплофізичних властивостей оболонки будівлі включає утеплення стін мінеральною ватою 10 см, утеплення даху керамзитом – 30 см, вікна – двокамерні металопластикові енергозберігаючі склопакети, металопластикові входні двері. Після впровадження комплексу енергозберігаючих заходів баланс тепловтрат будівель наведений на рис 3.

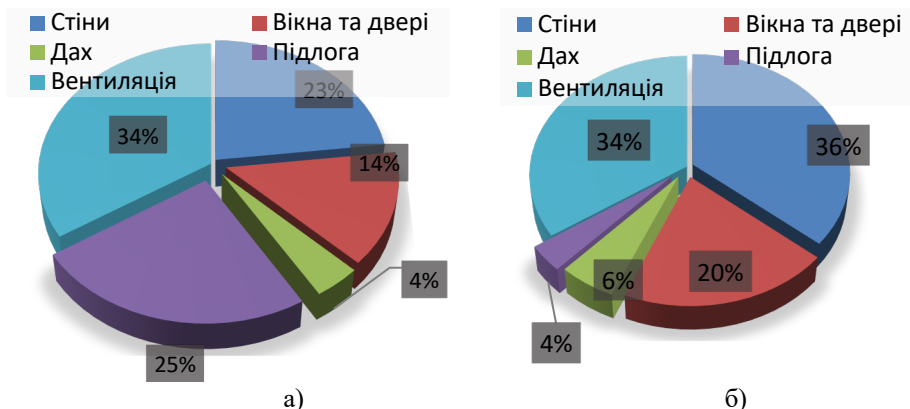


Рисунок 3 – Енергобаланс тепловтрат гімназії (а) та житлової будівлі (б)

В табл.2 наведено розрахунок потенціалу енергозбереження на основі 3-х раніше згаданих методів. Можлива економія теплової енергії після покращення теплозахисних властивостей оболонки будівлі становить: 30 та 55% - за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015, 40 та 65% - RETScreen та 35 та 60% - за динамічною моделлю 5R1C, для гімназії та ЖБ, відповідно. Відмінність результатів розрахунку пояснюється тим, що за методикою ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [7] теплоакумуючі властивості враховуються укрупнено, а саме через показник С, який характеризує теплоємність будівлі на одиницю площі (враховує акумуляцію зовнішніх огорожень). Для більшої частини будівель $C = 80 \text{ Вт}\cdot\text{год}/(\text{м}^2\text{К})$, що характерно для класу «важких» будівель, тобто для капітальних будівель з цегляними стінами товщиною (1,5-2 цеглини), із залізобетонними перекриттями. Програмний продукт RETScreen не враховує теплоакумуючих властивостей огорожень. Динамічна математична модель 5R1C враховує теплоакумуляційні властивості внутрішніх і зовнішніх огорожень будівлі. Відсоток економії при впровадженні комплексу енергозберігаючих заходів по покращенню теплофізичних властивостей в будівлі гімназії менший ніж в ЖБ, обумовлюється різними початковими термічними опорами огорожень, який був типовим для їх періоду зведення.

Потрібно відмітити, що розрахунок на базі трьох наведених математичних моделей використовує кліматичні дані різних часових інтервалів, які створені різними базами даних. RETScreen використовує кліматичні дані отримані та узагальнені NASA [12], динамічна модель 5R1C потребує погодинних кліматичних даних, тому використано погодинні кліматичні дані типового року файлу IWEC [13]. ДСТУ Б

A.2.2-12:2015 використовує середньомісячні дані з будівельної кліматології України [14]. Порівняльний аналіз кліматичних даних наведених проведений в статті [15].

Таблиця 2 – Споживання теплової енергії будівлями

Характеристика розрахунку	Призначення будівлі	RETScreen	ДСТУ Б А.2.2-12:2015	5R1C
		кВт год/рік		
існуючий стан	Гімназія	152433	165620,7	146285,7
	ЖБ	357955,8	416738,1	390139,5
після термомодернізації	Гімназія	84302	117473,8	94559,5
	ЖБ	120647,8	197509,5	138411,7
впроваджено переривчасті режими	Гімназія	70538,2	91428,7	84345,4
	ЖБ	104536,4	153624,5	124905,6

При модельному розрахунку впровадження переривчастих режимів опалення часовий інтервал пониження температури на 3°C обраний однаковий та становить 12 годин. Особливість двох розрахунків, що для гімназії характерним є пониження температури повітря в нічний час доби за відсутності учнів, в житловому будинку пониження температури відбувається в денний період доби, коли більша частина мешканців не знаходиться в будівлі. В денний період доби присутні сонячні тепло надходження в зону будівлі, що впливає на енергетичні характеристики будівлі.

З таблиці 2 слідує, що економія теплової енергії при впровадженні переривчастих режимів опалення для будівель з покращеними теплозахисними властивостями оболонки будівель становить: 22% - за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015, 16 та 13% - RETScreen та 11 та 10% - за динамічною моделлю 5R1C, для гімназії та ЖБ, відповідно. Для гімназії характерна орієнтація світлопрозорих елементів конструкцій на всі чотири сторони світу (Пн, Пд, Зх, Сх), площа застакнення на Пн та Пд орієнтації в двічі більша порівняно з Сх та Зх орієнтаціями фасадів. Для розглянутого ЖБ присутні вікна лише на Зх та Сх фасадах будівлі. Коефіцієнт застакнення для розглянутих репрезентативних будівель становить 0,25.

Отриманий відсоток економії теплової енергії за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015 для гімназії та ЖБ однакові, що пояснюється тим, що в значній мір економія теплової енергії залежить від співвідношення годин роботи з нормативною температурою $f_{n,hr}$ та рекомендованою температурою в період відсутності людей. Для розглянутих будівель період пониження рівня опалення становить 12 годин: для гімназії – в нічний період доби, для ЖБ – в денний.

Наведені значення економії теплової енергії від впровадження переривчастих режимів опалення – це максимально можливі значення економії теплової енергії будівлі для розглянутої глибини і інтервалу пониження температури в неробочі години в період відсутності людей. Доцільним є впровадження переривчастих режимів для окремих зон будівлі з врахуванням поведінково-експлуатаційних особливостей мешканців/відвідувачів для забезпечення комфортних умов в період перебування людей, що особливо актуальне для ЖБ, де режими експлуатації зон/квартир суттєво відрізняються.

Економія теплової енергії залежить від погодних коливань та змінюється протягом опалювального періоду. На рис. 4 наведено економію теплової енергії при впровадженні переривчастих режимів опалення для помісячних інтервалів. На рис 4 представлені результати розрахунку за квазістаціонарним методом за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 та динамічною моделлю 5R1C. Використання програми RETScreen не дозволяє провести розрахунок для помісячних інтервалів. Розрахунок за динамічною моделлю 5R1C проведений для подинних інтервалів зміни кліматичних даних та узагальнено для помісячних інтервалів.

Розрахунок за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015 дозволяє враховувати сезонні кліматичні коливання, за динамічною моделлю 5R1C можливе врахування сезонних та добових коливань, що обумовлює відмінність отриманої економії енергії від впровадження переривчастих режимів опалення (рис. 4, за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015 більша порівняно з динамічною моделлю 5R1C). За квазістаціонарним методом (ДСТУ Б А.2.2-12:2015) сезонна складова економії енергії від впровадження переривчастих режимів опалення залежить від величини γ_H (формула 8), безрозмірного співвідношення надходжень і втрат теплоти для режиму опалення. Для місяців лютий-квітень, жовтень (період весняного/осіннього міжсезоння та лютого, для яких характерна висока сонячна активність) величина коефіцієнту γ_H є максимальною: 0,17...0,4 – для ЖБ, 0,11...0,25 – для гімназії. Для періоду року з найменшою сонячною активністю (листопад-січень) величина економії теплової енергії змінюється менше (біля 30%) за ДСТУ Б А.2.2-12:2015, а величина коефіцієнту γ_H знаходиться в діапазоні 0,03...0,07.

Впровадження переривчастих режимів опалення дозволяє зменшити споживання теплової енергії в період відсутності людей шляхом пониження навантаження на систему опалення або короткостроковим відімкненням його, залежно від погодних умов, але для періоду присутності людей для забезпечення

комфортної нормативної температури повітря в будівлі теплове навантаження на систему опалення повинно бути збільшене порівняно з рівнем опалення, коли дотримується постійне значення температури повітря в приміщеннях будівлі, що в свою чергу призводить до збільшення споживання теплової енергії.

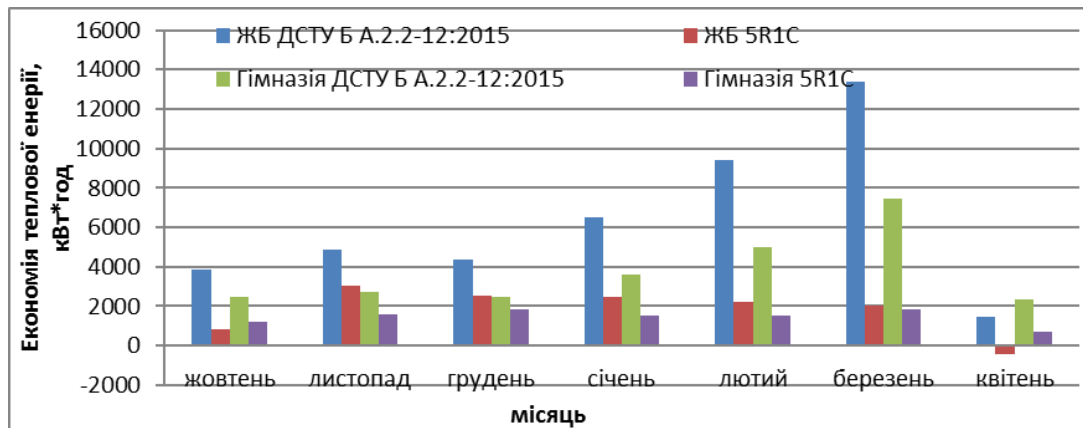


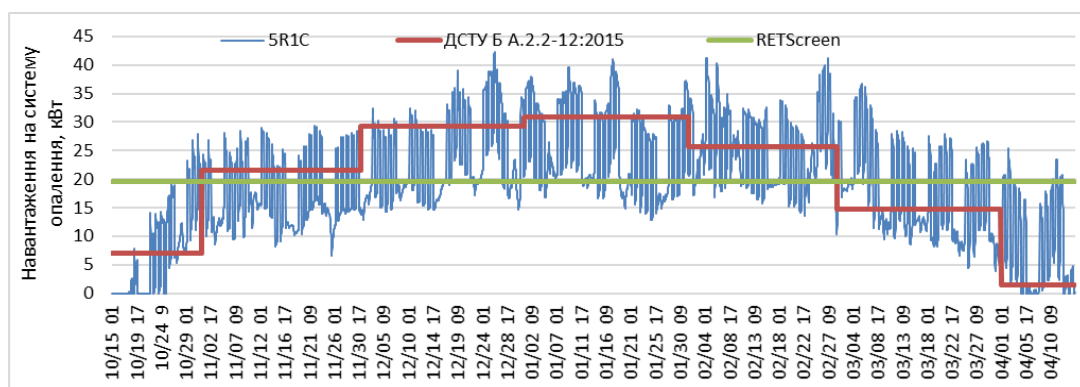
Рисунок 4 – Економія теплової енергії при впровадженні переривчастих режимів опалення

На рис. 4 для квітня для результатів розрахунку за моделлю 5R1C спостерігається, що для ЖБ впровадження переривчастих режимів опалення призводять до перевитрати теплової енергії, тобто величина споживання теплової енергії при впровадженні переривчастих режимів опалення на 400 кВт·год більше порівняно з постійними режимами. Потрібно відміти, що такий ефект залежить від орієнтації вікон, коефіцієнту застління, тому кожену будівлю потрібно розглядати індивідуально. Для гімназії спостерігається протилежний ефект для квітня, що пояснюється двома особливостями: 1) особливістю розташування світлопрозорих елементів конструкцій на фасадах будівлі різної орієнтації (40% вікон розташовані на Пд орієнтації); 2) період пониження температури в неробочі години (нічна частина доби).

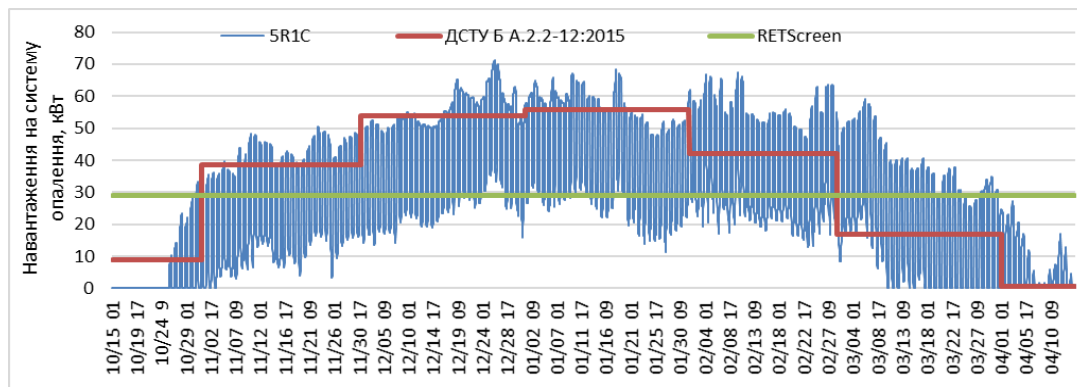
При виборі характеристик переривчастих режимів опалення слід враховувати співвідношення між величиною збільшення запасу теплової потужності та величиною пониження температури в неробочі години, які пов'язані обернено. При проектуванні зазвичай приймається 20% запасу теплової потужності.

На рис. 5 наведено теплове навантаження на систему опалення за трьома розглянутими методами: стаціонарний (програма RETScreen), квазістаціонарний (ДСТУ Б А.2.2-12:2015), динамічний метод 5R1C. Використання динамічного моделювання дозволяє об'єктивно оцінювати і передбачати споживанням енергії при дотриманні умов комфорту в період зайнятості приміщень будівлі.

Визначення навантаження на систему опалення за стаціонарним методом на основі програми RETScreen зображено на рис. 5 прямою лінією та може бути використане лише для оціночних розрахунків. З рис. 5 видно, що конфігурація графіку теплового навантаження на систему опалення визначеного для помісячних інтервалів за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015 має однакову конфігурацію для ЖБ та гімназії. Конфігурація погодинного навантаження на систему опалення розрахованого на основі динамічної сіткової моделі 5R1C має відмінний характер, що пояснює відпрацювання переривчастого режиму опалення при впровадженні його в різний час доби, тобто пониження температури в денний чи нічний час. Крім цього однією з найбільш вагомих складових впливу на енергоспоживання будівлі після термомодернізації є сонячні теплонадходження, які прямо залежать від площі та орієнтації вікон.



а)



б)

Рисунок 5 – Навантаження на систему опалення при впровадженні переривчастих режимів опалення в гімназії (а) та житловій будівлі (б)

Висновки

В роботі проведено аналіз впровадження комплексу енергозберігаючих заходів з покращення теплофізичних властивостей оболонки гімназії та житлової будівлі, а також впровадження переривчастих режимів опалення. Створено математичні моделі будівель на основі квазістаціонарної моделі за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015, стаціонарної моделі створеної на базі програмного продукту RETScreen та динамічної моделі 5R1C за стандартами EN ISO 13790 та EN 13786.

Розглянуті будівлі не відповідають сучасним вимогам, що висуваються до теплозахисних властивостей огорожень. Встановлено, можлива економія теплової енергії після покращення теплозахисних властивостей оболонки будівель до сучасних вимог становить біля 40% – за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015, біля 50% – RETScreen та біля 45% – за динамічною моделлю 5R1C. Відмінність отриманих результатів оцінки потенціалу енергозбереження залежить від урахування теплоаккумуляційних властивостей внутрішніх та зовнішніх огорожень, а саме RETScreen – не враховує, ДСТУ Б А.2.2-12:2015 – враховує укрупнене лише зовнішні огороження, 5R1C – враховує внутрішні і зовнішні огороження через спільний вузол теплоаккумуляції «С».

При впровадженні переривчастих режимів опалення шляхом пониження температури на 3°C від нормативної тривалістю 12 годин на добу: гімназія в нічний час доби понижує температуру, ЖБ – в денний час, що характерно експлуатаційно-поведінковим особливостям експлуатації будівель. За результатами моделювання встановлено, що за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015 максимально можлива економія теплової енергії за опалювальний сезон становить 22%, 15% – RETScreen та 10% – за динамічною моделлю 5R1C.

В подальших дослідженнях планується розглянути різні типи контролерів та відпрацювання ними зміни переривчастих чи постійних режимів опалення будівель, а також дослідити вплив режимів роботи системи опалення у вихідні дні, що може збільшити відсоток економії енергії для гімназії та зменшити – для ЖБ.

Список використаної літератури

1. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 - Energy Performance of Buildings Directive — EPBD //EN L 153/13, 19.05.2010, p. 23.
2. Nematchoua M.K, Marie-Reine Nishimwe A., Reiter S. Towards nearly zero-energy residential neighbourhoods in the European Union: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135 (2021) 110198. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110198
3. Fedorczak-Cisak M., Knap K., Kowalska-Koczwara A., Pachla F., Pekarchuk O. Energy and Cost Analysis of Adapting an Existing Building to 2017 Technical Requirements and Requirements for NZEB. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* Volume 471, Issue 11, 24 February 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/471/11/112094
4. ДБН В.2.6-31:2006. Конструкції будинків та споруд. Теплова ізоляція будівель. [На заміну СНиП II-3-79 ; чинний від 2007.04.01 зі Зміною №1 від 1 липня 2013 року]. К.: Мінбуд України, 2006. 70 с.
5. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель [Чинний з 08.10.2016]. К.: Державне підприємство "Укрархбудінформ", 2016. 33 с.
6. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Буяк Н.А. ВПЛИВ ПЕРЕРИВЧАСТИХ РЕЖИМІВ ОПАЛЕННЯ НА ДИНАМІКУ ЕНЕРГОПОТРЕБИ ТА УМОВИ КОМФОРТНОСТІ БУДІВЕЛЬ З РІЗНИМ РІВНЕМ ТЕПЛООВОГО ЗАХИСТУ. *Наукові вісті НТУУ КПІ*. 2019. №4. С. 7-16.

7. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні / ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [Національний стандарт України] – К.: Мінрегіон України, 2015, - 203 с.

8. Deshko V.I., Bilous I.Yu., Sukhodub I.O. MATHEMATICAL MODELS FOR DETERMINATION OF SPECIFIC ENERGY NEED FOR HEATING USED IN UKRAINE. Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES). 2018. No.1. Pp. 13-25.

9. ДСТУ Б EN ISO 13790:2011. Енергоефективність будівель. Розрахунок енергоспоживання при опаленні та охолодженні (EN ISO 13790:2008, IDT). [На заміну ГОСТ 26629.85; чинний з 01.01.2013]. К. : НДІБК, 2011. 229 с.

10. EN ISO 13786:2007. Thermal performance of building component - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods. — CEN. European Committee for Standardization, 2007. 27 p.

11. Bilous, I.Yu., Deshko, V.I., Sukhodub, I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. Magazine of Civil Engineering. 2020. 96(4). Pp. 27–41.

12. RETScreen - Clean Energy Management Software [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/data-analysis-software-modelling/retscreen/7465>

13. International Weather for Energy Calculations: https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR.

14. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. К., 2011. 127 с.

15. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гетманчук Г.О. Бази кліматології для визначення енергетичних характеристик будівель. Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». Випуск №4 Київ 2017. С 67-73.

V. Deshko, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-8218-3933

I. Bilous, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-6640-103X

N. Buyak, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-0597-6945

O. Petruchenko, ORCID 0000-0002-4982-4217

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ENERGY EFFICIENT HEATING MODES ON BUILDINGS ENERGY USE BASING ON THE MATHEMATICAL MODELING

Global trends of increasing the buildings energy efficiency are aimed at reducing energy use to nearly zero consumption (nZEB). Achieving the nZEB level requires the implementation of a set energy-saving measures to improve the thermophysical properties of fences, building engineering systems and the use of renewable energy sources. One of low-cost and energy-efficient measures to increase the level of energy efficiency of buildings is the introduction of energy-efficient intermittent heating modes of buildings. Usually, this measure is appropriate and possible after the thermal modernization of the building. Determining the energy performance of buildings for the introduction of intermittent heating modes requires the use of mathematical models. The paper compares the application of different mathematical models and methods for estimating thermal energy savings in thermal modernization and implementation of intermittent heating modes based on the quasi-stationary model according to DSTU B A.2.2-12: 2015, stadium model created on the basis of RETScreen software and dynamic model 5R1C according to EN ISO 13790 and EN 13786. Heat-accumulation properties of building enclosures in RETScreen are not taken into account, in DSTU B A.2.2-12: 2015 - are taken into account for external enclosures, 5R1C - both internal and external enclosures are taken into account. The calculation was made for a residential building and a gymnasium located in the city of Kyiv. The introduction of a set of measures for thermal modernization of building fences will reduce heat consumption by 60 and 35% for residential building reinforced and gymnasiums, respectively. Introduction of intermittent heating modes for buildings after thermal modernization / modern buildings allows to save on heating more than 15% - determined on the basis of RETScreen program, 10% - on the basis of dynamic grid model 5R1C, 22% - on the basis of quasi-stationary method according to DSTU B A.2.2-12: 2015, for a residential building and a gymnasium building located in Kyiv.

Keywords: mathematical modeling, buildings, intermittent heating modes, energy saving.

REFERENCES

1. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 - Energy Performance of Buildings Directive — EPBD //EN L 153/13, 19.05.2010, p. 23.

2. Nematoucha M.K, Marie-Reine Nishimwe A., Reiter S. Towards nearly zero-energy residential neighbourhoods in the European Union: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135 (2021) 110198. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110198
3. Fedorczyk-Cisak M., Knap K., Kowalska-Koczwara A., Pachla F., Pekarchuk O. Energy and Cost Analysis of Adapting an Existing Building to 2017 Technical Requirements and Requirements for NZEB. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* Volume 471, Issue 11, 24 February 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/471/11/112094
4. DBN V.2.6-31:2006. Konstruktsii budynkiv ta sporud. Teplova izoliatsia budivel. [Na zaminu SNiP II-3-79 ; chunnyi vid 2007.04.01 zi Zminou №1 vid 1 lypnia 2013 roku]. K.: Minbud Ukrainy, 2006. 70 s.
5. DBN V.2.6-31:2016. Konstruktsii budynkiv ta sporud. Teplova izoliatsia budivel. [chunnyi vid 08.10.2016]. K.: «Ukrarhbudinform», 2006. 70 s.
6. Deshko V., Bilous I., Buiak N. Vplyv pereryvchastykh rezhymiv opalennia na dynamiku enerhopotreby ta umovy komfortnosti budivel z riznym rivnem teplovoho zakhystu. [Influence of intermittent heating modes on the dynamics of energy consumption and comfort conditions of buildings with different levels of thermal protection] *Naukovi visti NTUU KPI*. 2019. №4. S. 7-16.
7. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrahunku enerhospozhyvannia pry opalenni, okholodzhenni, ventyliatsii, osvittleni ta hariachomu vodopostachanni / DSTU B A.2.2-12:2015 [Natsionalnyi standart Ukrainy] – K.: Minrehion Ukrainy, 2015, - 203 s.
8. Deshko V.I., Bilous I.Yu., Sukhodub I.O. MATHEMATICAL MODELS FOR DETERMINATION OF SPECIFIC ENERGY NEED FOR HEATING USED IN UKRAINE. *Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES)*. 2018. No.1. Pp. 13-25.
9. DSTU B EN ISO 13790:2011. Enerhoefektyvnist budivel. Rozrakhunok enerhospozhyvannia pry opalenni ta okholodzhenni (EN ISO 13790:2008, IDT). [Na zaminu HOST 26629.85; chunnyi z 01.01.2013]. K. : NDIBK, 2011. 229 s.
10. EN ISO 13786:2007. Thermal performance of building component - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods. — CEN. European Committee for Standardization, 2007. 27 p.
11. Bilous, I.Yu., Deshko, V.I., Sukhodub, I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. 96(4). Pp. 27–41.
12. RETScreen - Clean Energy Management Software [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/data-analysis-software-modelling/retscreen/7465>
13. International Weather for Energy Calculations: https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR.
14. DSTU -N B V.1.1-27:2010. Budivelna klimatologia. K., 2011. 127 s.
15. Deshko V.I., Bilous I.Iu., Hetmanchuk H.O. Bazy klimatologii dlia vyznachennia enerhetychnykh kharakterystyk budivel. [Climatology bases for determining the energy performance of buildings] *Naukovyi zhurnal «Enerhetyka: ekonomika, tekhnologii, ekolohiia»*. Vypusk №4 Kyiv 2017. S 67-73.

Надійшла 18.11.2020
Received 18.11.2020