

# ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.20535/kpi-sn.2019.4.180731

УДК 697.1

В.І. Дешко, І.Ю. Білоус, Н.А. Буяк\*  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна  
\*corresponding author: te@kpi.ua

## ВПЛИВ ПЕРЕРИВЧАСТИХ РЕЖИМІВ ОПАЛЕННЯ НА ДИНАМІКУ ЕНЕРГОПОТРЕБИ ТА УМОВИ КОМФОРТНОСТІ БУДІВЕЛЬ ІЗ РІЗНИМ РІВНЕМ ТЕПЛООВОГО ЗАХИСТУ

**Проблематика.** На сьогодні набувають актуальності питання підвищення енергоефективності будівель та одночасного забезпечення належної якості мікроклімату в будівлях за умови зміни параметрів довкілля.

**Мета дослідження.** Аналіз енергоефективності будівлі як енергетичної системи при застосуванні динамічного енергетичного моделювання з урахуванням взаємозв'язку показників теплового комфорту, теплового захисту і параметрів мікроклімату приміщень за умови переривчастого опалення.

**Методика реалізації.** Для дослідження енергетичних характеристик будівлі було створено динамічні імітаційні моделі кімнати на базі програмного продукту EnergyPlus. Для оцінки рівня теплового комфорту застосовано енергетичну модель теплообміну людини з навколишніми предметами, що ґрунтується на рівняннях теплового балансу для людського тіла.

**Результати дослідження.** Отримано графічні залежності зміни показників теплового комфорту і параметрів мікроклімату за умови регулювання та зміни параметрів довкілля для опалювального періоду. Визначено питому енергопотребу на опалення для різних теплоінерційних особливостей огорожень і глибин зниження температури в неробочі години, а також для різних теплоінерційних особливостей зовнішніх огорожень, орієнтованих на південь та північ. Встановлено значення економії теплової енергії при зниженні температури в неробочі години.

**Висновки.** Встановлено що зниження температури на  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  зумовлює зниження  $PMV \leq -0,5$  для північної орієнтації, що погіршує умови перебування людей і не є доцільним. Визначено, що впровадження переривчастих режимів опалення дає змогу досягти економії теплової енергії близько 16–25 % залежно від орієнтації, глибини провалу і теплофізичних властивостей огороження. Збільшення діапазону коливання навантаження на систему опалення для південної орієнтації пояснюється додатковими теплонадходженнями від сонця в зону кімнати, а також тим, що періоди переривчастого відключення опалення характерні для початку та кінця опалювального сезону. Для південної орієнтації тривалість періоду опалення менша в середньому на 20 днів.

**Ключові слова:** енергопотреба; тепловий комфорт; прогнозована середня оцінка тепловідчуттів людини; середня радіаційна температура; операційна температура; переривчасте опалення.

### Вступ

Підвищення енергоефективності будівель та одночасне забезпечення належної якості мікроклімату в будівлях є актуальною науково-практичною задачею. Вона розв'язується за рахунок комплексу заходів, які стосуються огорожувальних конструкцій та інженерних систем.

З урахуванням тенденцій, спрямованих на децентралізацію систем опалення, маловитратним заходом з ефективного використання енергії є застосування переривчастих режимів опалення, тобто зниження температури в години відсутності людей у приміщенні. При цьому тепловий комфорт визначається температурою повітря в приміщенні. Для оцінки теплового комфорту використовуються різні показники і типи шкал, в основі яких лежить та чи інша модель теплового комфорту [1]. Аналізуючи їх, можна стверджувати, що тепловий комфорт залежить

від суб'єктивних, об'єктивних і фізіологічних параметрів.

В основі міжнародного стандарту EN ISO 7730 щодо оцінки теплового комфорту в приміщенні лежить стаціонарна модель теплового балансу для людського тіла, розроблена Фангером [2]. Цей стандарт наводить приклади рекомендованих категорій для проектування будівель із механічним опаленням та охолодженням. Виділяють чотири категорії будівель залежно від значення індексу прогнозованої середньої оцінки тепловідчуттів людини  $PMV$ .

Існуючі стандарти щодо оцінки теплового комфорту в приміщенні ґрунтуються на енергетичному балансі між тілом людини та навколишніми предметами, чим обумовлюють розрахунок  $PMV$ . Показник  $PMV$  вказує на дисбаланс між тепловиділенням людини в заданих умовах і тепловиділенням, необхідним для оптимального теплового комфорту.  $PMV = 0$  вказує на

умови, за яких кількість енергії, що виробляється людиною, дорівнює кількості енергії, що віддається в навколишнє середовище шляхом конвекції, радіації, випаровування та теплопровідності. Один із сучасних напрямів визначення комфортних умов – це розрахунок рівня споживання ексергії людським тілом. У працях М. Прека [3–5], М. Шукуї [6–9], К. Ісави [10] та інших відображено розвиток ексергетичного підходу до теплового комфорту, що враховує механізм терморегуляції людини, а отже, дає можливість знизити рівень комфортних температур, тим самим забезпечуючи економію енергоресурсів.

Кількість наукових праць, присвячених тематиці теплового комфорту, зростає з експоненціальною швидкістю [11]. Поглиблення досліджень у цій галузі дасть змогу знизити енергоспоживання будівель з одночасним забезпеченням належного рівня комфортних умов перебування людини. Включення людини у складну систему “джерело теплоти–огороження будівлі” [12, 13] через визначення комфортної температури повітря в приміщенні залежно від суб’єктивних та об’єктивних параметрів теплового комфорту дасть змогу проектувати та експлуатувати будівлі з вибраним рівнем теплового комфорту та знизити їх енергоспоживання.

Численні наукові дослідження [14–18] вказують на значний вплив поведінки мешканців будівель на енергопотребу. Не менш вагомий вплив на енергоспоживання будівель мають параметри довкілля, що динамічно змінюються і визначають зміну енергоспоживання. Тому оцінка показників теплового комфорту за умови динамічної зміни параметрів довкілля та врахування впливу поведінки людини покаже можливість регулювання системи опалення з метою забезпечення належного рівня теплового комфорту і можливого зниження енергоспоживання.

### Постановка задачі

Метою роботи є аналіз енергоефективності будівлі як енергетичної системи при застосуванні динамічного енергетичного моделювання з урахуванням взаємозв’язку показників теплового комфорту, теплового захисту і параметрів мікроклімату приміщень за умови переривчастого опалення.

Відповідно до поставленої мети мають бути вирішені такі завдання:

1. Створення динамічних моделей кімнати з найбільш поширеними для умов України

теплофізичними та геометричними характеристиками в програмному середовищі EnergyPlus для дослідження теплоенергетичних характеристик і визначення показників комфортності.

2. Аналіз впливу переривчастих режимів опалення на зміну об’єктивних параметрів мікроклімату та показників теплового комфорту протягом опалювального періоду для різних умов теплового захисту.

3. Аналіз впливу зміни режимів переривчастого опалення на енергетичні характеристики будівлі за різних теплофізичних і геометричних характеристик оболонки будівлі.

### Матеріали і результати досліджень

**Опис моделі.** Модель кімнати побудована на основі сіткових моделей у середовищі програмного продукту EnergyPlus. В основу математичної постановки покладено систему рівнянь теплообміну між повітрям у приміщенні та зовнішнім середовищем за рахунок трансмісійної теплопередачі та радіаційного теплообміну огорожень з урахуванням нестационарних процесів акумуляції енергії в елементах конструкцій будівлі [19].

Рівень теплового комфорту оцінюється за допомогою індексу *PMV*. Індекс *PMV* вказує на дисбаланс між тепловиділенням людини в заданих умовах і тепловиділенням, необхідним для оптимального теплового комфорту. В роботі використана модель, представлена в стандарті ISO Standard 7730. Вона ґрунтується на рівняннях теплового балансу для людського тіла і має таку математичну постановку:

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-2,1 \cdot M} + 0,028) \times [(M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}], \quad (1)$$

де  $M$  – ступінь метаболізму, Вт/м<sup>2</sup>;  $W$  – ефективна механічна робота, Вт/м<sup>2</sup>;  $H$  – втрати теплоти випромінюванням (sensitive heat losses), Вт/м<sup>2</sup>;  $E_c$  – теплообмін випаровуванням зі шкіри, Вт/м<sup>2</sup>;  $C_{res}$  – теплообмін конвекцією під час дихання, Вт/м<sup>2</sup>;  $E_{res}$  – теплообмін випаровуванням під час дихання, Вт/м<sup>2</sup>;

$$H = 3,96 \cdot 10^8 \cdot f_{cl} \cdot [(9t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_{cl} \cdot (t_{cl} - t_a), \quad (2)$$

$$E_c = 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15], \quad (3)$$

$$C_{\text{res}} = 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a), \quad (4)$$

$$E_{\text{res}} = 1,7 \cdot 10^5 \cdot M \cdot (5867 - p_a), \quad (5)$$

де  $f_{\text{cl}}$  – фактор, що враховує площу поверхні одягу;  $t_a$  – температура повітря, °С;  $t_r$  – середня радіаційна температура, °С;  $t_{\text{cl}}$  – температура поверхні одягу, °С;  $p_a$  – парціальний тиск пари у повітрі, Па;  $I_{\text{cl}}$  – термічний опір одягу, м<sup>2</sup>·°С/Вт;  $v_{\text{air}}$  – відносна швидкість руху повітря, м/с;  $h_{\text{cl}}$  – коефіцієнт конвективного теплообміну, Вт/м<sup>2</sup>·К.

Основна складність цього підходу полягає у визначенні температури поверхні одягу людини з використанням методу ітерацій з рівняння теплового балансу для шару одягу:

$$(t_{\text{sk}} - t_{\text{cl}}) = 3,96 \cdot 10^8 \cdot f_{\text{cl}} \cdot [(t_{\text{cl}} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{\text{cl}} \cdot h_{\text{cl}} \cdot (t_{\text{cl}} - t_a), \quad (6)$$

$$t_{\text{sk}} = 35,7 - 0,028(M - W). \quad (7)$$

Коефіцієнт конвективного теплообміну визначається таким чином:

$$h_{\text{cl}} = \begin{cases} 2,38 |t_{\text{cl}} - t_a|^{0,25}, & \text{якщо } 2,38 |t_{\text{cl}} - t_a|^{0,25} > 12,1\sqrt{v_{\text{ar}}}, \\ 12,1\sqrt{v_{\text{ar}}}, & \text{якщо } 2,38 |t_{\text{cl}} - t_a|^{0,25} < 12,1\sqrt{v_{\text{ar}}}, \end{cases} \quad (8)$$

Фактор, що враховує площу поверхні одягу:

$$f_{\text{cl}} = \begin{cases} 1,00 + 1,29 \cdot I_{\text{cl}}, & \text{якщо } I_{\text{cl}} \leq 0,78 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}, \\ 1,05 + 1,645 \cdot I_{\text{cl}}, & \text{якщо } I_{\text{cl}} > 0,78 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}. \end{cases} \quad (9)$$

Модель, представлена співвідношеннями (1)–(9), була розроблена П. Фангером [20], а показник *PMV* обґрунтований на базі великої кількості експериментів, однак тут не прописаний механізм терморегуляції, що є суттєвим при розрахунку теплообміну людини.

**Вихідні дані.** Для дослідження енергетичних характеристик будівлі було створено динамічні імітаційні моделі кімнати для теплофізичних властивостей огорожень типу “хрущівка” і “сталінка” для коефіцієнта засклення 0,4.

Розміри кімнати – 5,5–6,1 м, висота приміщення – 3,2 м. Кімната має одну зовнішню стіну (5,5 м) з вікном, орієнтовану на північну (Пн) або південну (Пд) сторону. Вікно – двокамерний металопластиковий склопакет із повітряним заповненням. Несуча частина зовнішньої стіни виконана на основі цегельної кладки:

1) в одну цеглу (250 мм); 2) у дві цегли (500 мм). Несуча частина внутрішніх стін виконана з цегляної кладки у півцеглини. Переkritтя над опалюваними приміщеннями залізобетонні – 200 мм. Вентиляція природна з кратністю повітрообміну 1 год<sup>-1</sup>. У роботі розглянуто утеплення мінеральною ватою товщиною 10 см. Переривчасті режими опалення впроваджуються з 20:00 до 6:00 щоденно. У дослідженні використанні погодинні кліматичні дані типового року міжнародного погодного файлу IWEC для умов м. Києва [21], які подані в розширенні “EPW” для легкої синхронізації з імітаційною моделлю на основі EnergyPlus. Для перерахунку сонячної активності на вертикальні поверхні використана методика “Full interior and exterior with reflection”, що враховує положення сонця відносно горизонту протягом року та його зміни протягом доби.

Геометрія репрезентативних приміщень створювалась у графічному редакторі Google-Sketchup. Крок дискретизації розрахунку вибраний 1 год. Динамічна енергетична модель дає змогу отримувати погодинні температури повітря та поверхонь у зоні кімнати, рівень опалення для різних режимів роботи з урахуванням інерційних особливостей огорожень в умовах динамічної зміни параметрів зовнішнього середовища та керування режимами опалення.

Для оцінювання показників теплового комфорту суб’єктивні параметри мікроклімату покладаються такими: термічний опір одягу людини  $I_{\text{cl}} = 0,155$  м<sup>2</sup>·°С/Вт; активність людини (метаболізм)  $M = 70$  Вт/м<sup>2</sup>.

Розроблені моделі дають змогу оцінювати динаміку змін енергетичних характеристик будівлі та індекс комфорту *PMV*, який розраховується за допомогою співвідношень (1)–(9), до та після утеплення; при постійних та переривчастих режимах опалення; репрезентативні приміщення орієнтовані на Пд і Пн.

**Вплив переривчастого опалення, теплоізоляції та орієнтації на показники і параметри теплового комфорту.** Оцінка індексу *PMV*, що залежить від суб’єктивних (у цьому дослідженні сталих) та об’єктивних (кратність повітрообміну покладається  $n = 1$  год<sup>-1</sup>, а інші – температура повітря в приміщенні  $t_a$ , середня радіаційна температура  $t_r$ , вологість – є динамічно змінними) параметрів мікроклімату, для опалювального періоду в умовах України є важливим завданням.

На рис. 1 відображена зміна *PMV* у розрізі опалювального періоду для репрезентативної

кімнати; масивність зовнішньої стіни – 250 мм, коефіцієнт засклення – 0,4, для Пн- та Пд-орієнтації стіни з ізоляцією (мінеральна вата) 10 мм. На рис. 2 для цих же умов – зміна середньої радіаційної температури. Діапазон зміни  $PMV$  для кімнати Пн-орієнтації: від  $-0,5$  до  $-0,3$ ; Пд: від  $0,65$  до  $-0,4$ .

Теплоізоляція Пд-стіни дає змогу підвищити  $PMV$  на  $0,01$ , що зумовлено підвищенням  $t_r$ . Зміна орієнтації будівлі підвищує  $PMV$  у середньому на  $0,2$  на Пд для опалювального

періоду, що зумовлено підвищенням  $t_r$  за рахунок надходження сонячного випромінювання. Для Пд-орієнтації характерні суттєві добові коливання  $PMV$ , що пояснюються сонячним випромінюванням.

Для Пн-орієнтації добові коливання  $PMV$  значно менші, на відміну від Пд. Підвищення рівня комфорту для кімнати Пд-орієнтації обумовлене надходженням сонячного випромінювання, і, якщо не враховувати міжсезоння, то діапазон зміни  $PMV$  для Пд стіни – від  $-0,5$  до  $0$ .

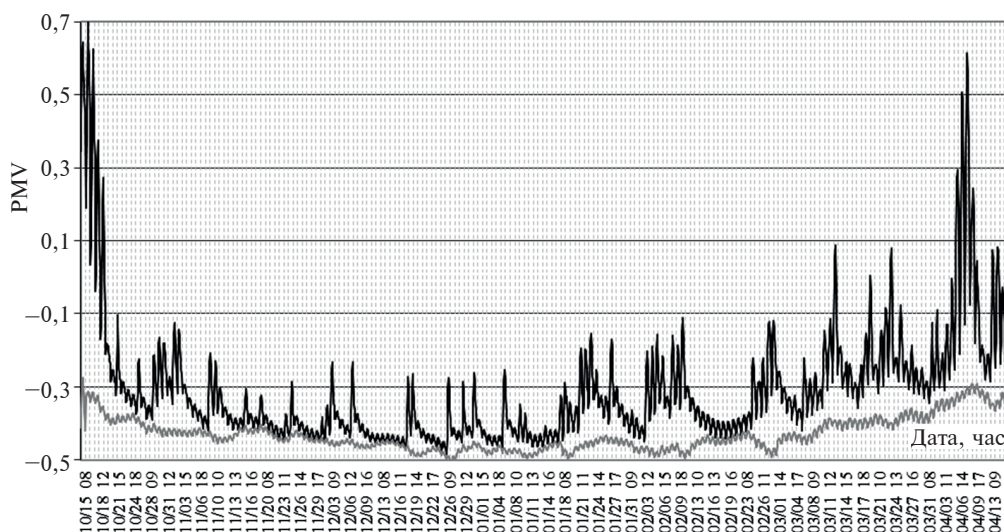


Рис. 1. Зміна  $PMV$  у розрізі опалювального періоду: — Пд-орієнтація; — Пн-орієнтація

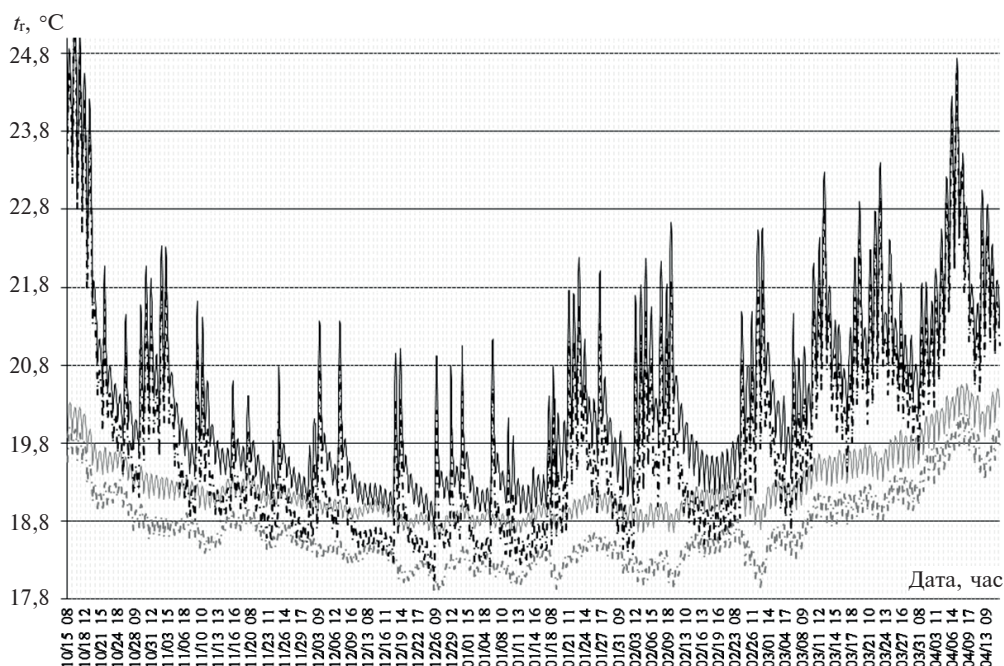


Рис. 2. Зміна середньої радіаційної температури  $t_r$  у розрізі опалювального періоду: — Пд-орієнтація, з ізоляцією; — • — Пд-орієнтація, без ізоляції; — Пн-орієнтація, з ізоляцією; — • — Пн-орієнтація, без ізоляції

Зміна середньої радіаційної температури (див. рис. 2) обумовлена зміною температури довкілля та надходженням сонячного випромінювання. Діапазон зміни середньої радіаційної температури для заданих умов для опалювального періоду становить 17,9–25 °С. У середньому для опалювального сезону теплоізоляція Пн стіни дає можливість підвищити  $t_r$  до 0,7 °С, а Пд – до 0,4 °С.

Для Пд-орієнтації характерні значні добові коливання  $t_r$ , що пояснюються сонячним випромінюванням. При збільшенні сонячної активності спостерігається зменшення відмінностей  $t_r$  для утепленої та неутепленої стіни, орієнтованої на Пд. Для Пн-орієнтації добові коливання  $t_r$  значно менші, на відміну від Пд, але діапазон коливань зберігається приблизно однаковим для утепленої та неутепленої стіни.

Отже, зміна орієнтації стіни суттєвіше впливає на значення середньої радіаційної температури, а отже, і на тепловідчуття людини порівняно з теплоізоляцією.

Зниження температури у неробочі години дає змогу зменшити енергоспоживання, однак його вплив на показники теплового комфорту потребує додаткового аналізу.

Зниження температури в приміщенні зумовлює зниження середньої радіаційної температури та індексу *PMV*. Кількісно ця зміна раніше не досліджувалася і є важливою в умовах актуальності підвищення якості мікроклімату. Зміна  $t_r$  оцінювалася за допомогою EnergyPlus як середньозважена по площах для репрезентативної кімнати з однією зовнішньою стіною масивністю 250 мм (без утеплення), варіанти орієнтації на Пн та Пд, коефіцієнт засклення – 0,4. Зниження температури здійснюється на 2 і на 4 °С з 20:00, підвищення температури починається о 6:00.

На рис. 3 показана зміна середньої радіаційної температури  $t_r$  за умови зниження температури у неробочі години для Пн- і Пд-орієнтації для репрезентативного місяця (лютого) опалювального періоду. Зниження температури зумовлює зниження середньої радіаційної температури. Діапазон зміни  $t_r$  для Пн-стіни без регулювання становить 17,6–18,6 °С, з регулюванням – 15,8 –18,2 °С. Зниження температури повітря в приміщенні в неробочі години на 4 °С зумовлює зниження середньої радіаційної температури в період денного максимуму на 1 °С для кімнати з Пд-орієнтацією.

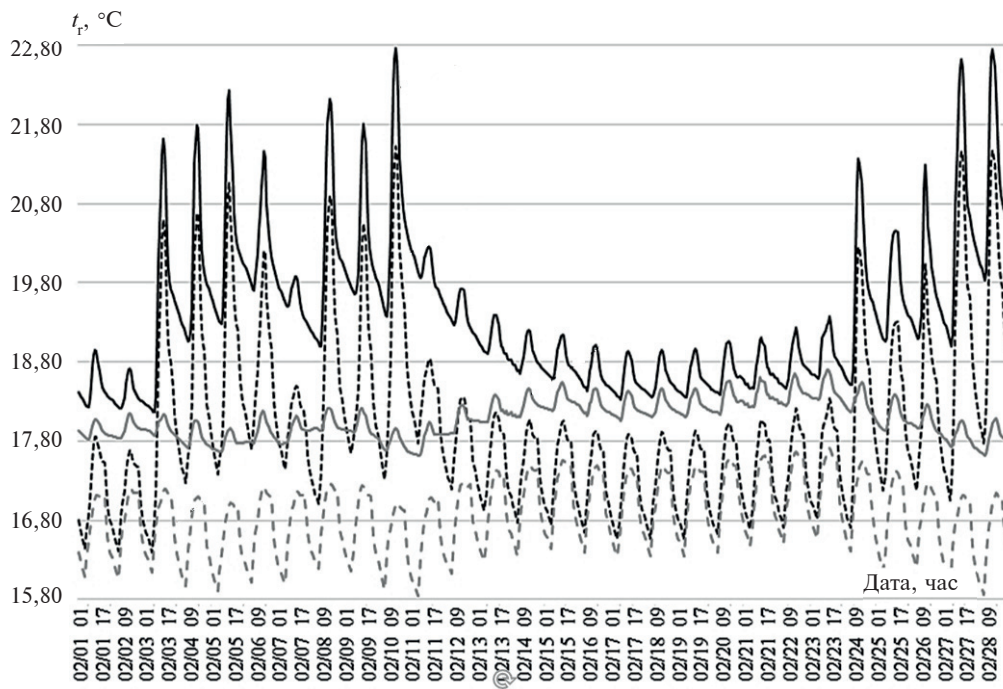


Рис. 3. Зміна середньої радіаційної температури  $t_r$  для лютого за умови регулювання: — — — — Пд-орієнтація, без регулювання; - - - - Пд-орієнтація, зниження температури на 4 °С у неробочі години; — — — — Пн-орієнтація, без регулювання; - - - - Пн-орієнтація, зниження температури на 4 °С у неробочі години

Як і при постійних режимах опалення, для Пд-орієнтації характерні істотні добові коливання  $t_r$ , при впровадженні переривчастих режимів опалення (зниження на 4 °С) вони збільшилися в понад 2 рази, на Пн – у понад 4 рази.

Зміна  $PMV$  за умови зниження температури в неробочі години для Пд- і Пн-орієнтації для репрезентативного місяця (лютого) опалювального періоду відображена на рис. 4, а і б відповідно. Для місяця лютого, серед трьох зимових місяців, характерні найнижча температура та висока сонячна активність, що дає змогу більш виражено продемонструвати їх вплив на зміну  $PMV$ . Значення  $PMV$  оцінювалося для робочих годин з 8.00 до 20.00. У цьому випадку зміна  $PMV$  обумовлювалася коливаннями не тільки  $t_r$ , а ще й  $t_a$ . Отже, аналізуючи значення  $PMV$  для

Пн-кімнати, можна зробити висновок, що зниження температури на 4 °С зумовлює зниження середньої радіаційної температури і  $PMV$  нижче -0,5, що відповідає пониженню уже до III категорії будівлі щодо забезпечення комфортних умов відповідно до ДСТУ Б EN 15251:2011. Для приміщення з Пд-орієнтацією таке зниження  $PMV$  характерне для зниження температури повітря в неробочі години на 4 °С і лише для кількох діб.

**Аналіз зміни енергопотребы для різних теплофізичних властивостей огорожень і режимів роботи системи опалення.** На основі погодинного динамічного енергетичного моделювання репрезентативних приміщень будівлі проведено визначення річної енергопотребы. На рис. 5 показано вплив на річну енергопотребу в опаленні

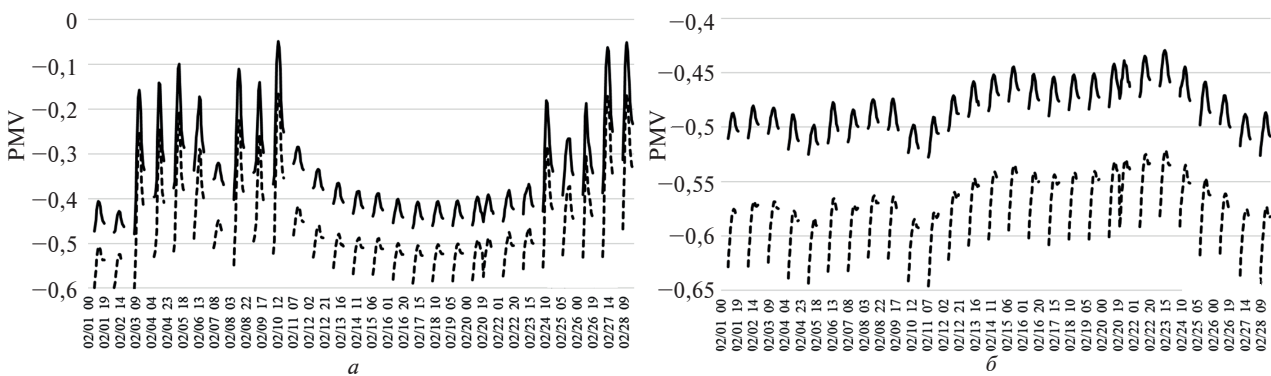


Рис. 4. Зміна  $PMV$  за умови регулювання на південь (а) і північ (б): — без регулювання; - - - - зниження температури на 4 °С у неробочі години

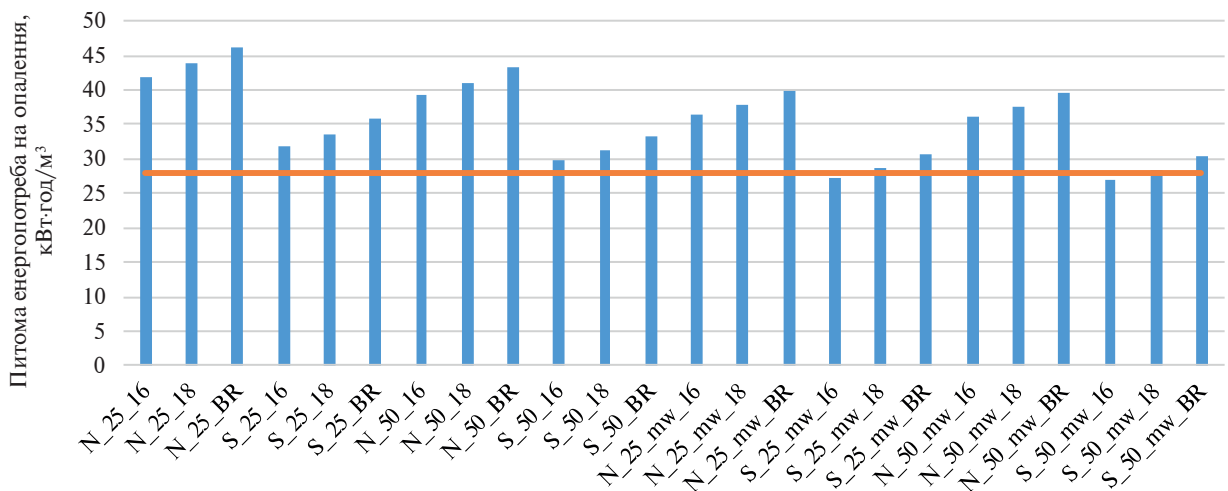


Рис. 5. Питома енергопотреба на опалення для різних теплоінерційних особливостей огорожень і глибин зниження температури в неробочі години: північна (N) та південна (S) орієнтація приміщення; товщина несучого шару червоної цегли 50 і 25 см; mw – наявність як утеплювача мінеральної вати; BR – без регулювання системи опалення; 16 та 18 – рівні температури в неробочі години при впровадженні переривчастих режимів опалення, °С; — нормативне значення енергопотребы на опалення, охолодження та гаряче водопостачання, кВт·год/м³

переривчастих режимів опалення для різної масивності огорожень та опору теплопередачі. Відповідно до рекомендацій стандарту EN 12831:2003 [22], глибина зниження температури в неробочі години з 20:00 до 6:00 вибрана 2 та 4 °С від нормативної (20 °С).

Відмінність річної енергопотребы приміщень, орієнтованих на Пн і Пд, без та з регулюванням рівня опалення в неробочі години становить близько 20 % незалежно від наявності утеплювача (легкий матеріал). У середньому для зимового періоду року економія становить 8–10 %, для періоду міжсезоння – понад 25 %.

При зниженні температури в неробочі години до 18 °С (на 2 °С) у річному розрізі можна досягти економії теплової енергії до 9 % для Пн та до 11 % для Пд для всіх розглянутих варіантів зовнішніх огорожень. При зниженні температури в неробочі години до 16 °С (на 4 °С) у річному розрізі можна досягти економії теплової енергії до 16 % для Пн та до 20 % для Пд для всіх розглянутих варіантів зовнішніх огорожень, тобто збільшення провалу на 2 °С збільшує економію енергії в два рази. Ще більше зниження температури в неробочі години є недоцільним, адже істотно завищує потужність системи опалення в період форсування та суперечить рекомендаціям стандарту EN 12831:2003.

Прямою лінією на рис. 6 показано питому енергопотребу на опалення, охолодження та гаряче водопостачання для I температурної зони відповідно до ДБН В.2.6-31:2016, тому відмінність розрахункових і нормативного значень буде більша.

На рис. 6 і 7 наведено помісячні питомі енергопотреби на опалення для Пд- і Пн-орієнтації відповідно.

Для приміщень Пд-орієнтації енергопотреба в період весняного та осіннього міжсезоння може відрізнятись у чотири рази (в межах 40–65 %) порівняно з аналогічними приміщеннями Пн-орієнтації, для зимових місяців – на 15–20 %.

З аналізу навантаження на систему опалення для погодинних інтервалів слідує, що діапазон коливань навантаження на систему опалення дещо більший для Пд-орієнтації, ніж для Пн, що пов'язано із сонячними теплонадходженнями в зону кімнати. Для періоду міжсезоння при погодинному розрахунку спостерігається відключення опалення в періоди пікової сонячної активності. Для огорожень із покращеними теплофізичними властивостями (шар утеплення 10 см) відключення опалення для приміщення, орієнтованого на Пд, є значно частішим і спостерігається для холодних місяців

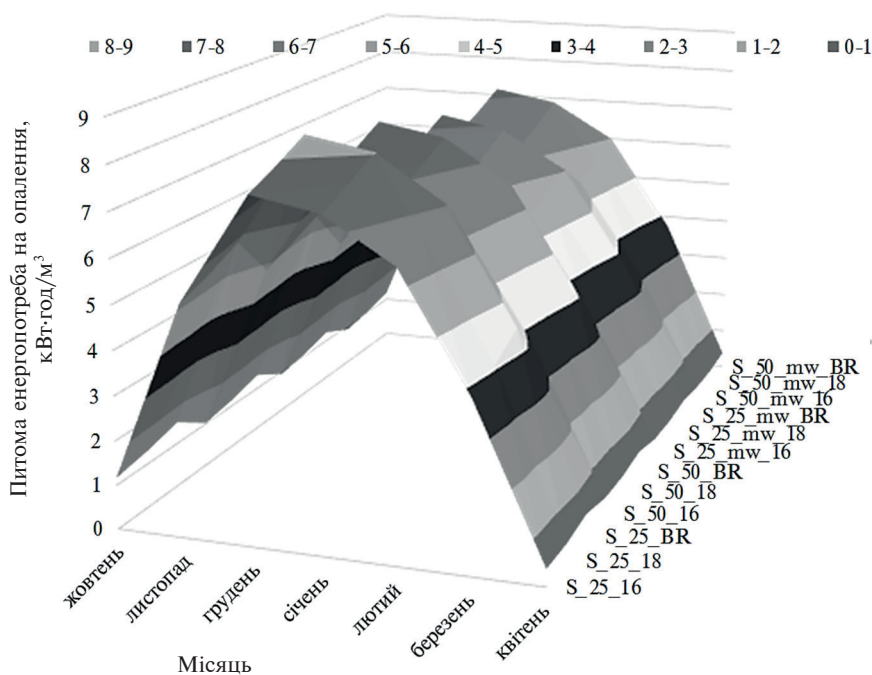


Рис. 6. Питома помісячна енергопотреба на опалення для різних теплоінерційних особливостей зовнішніх огорожень, орієнтованих на південь, і глибин зниження температури в неробочі години

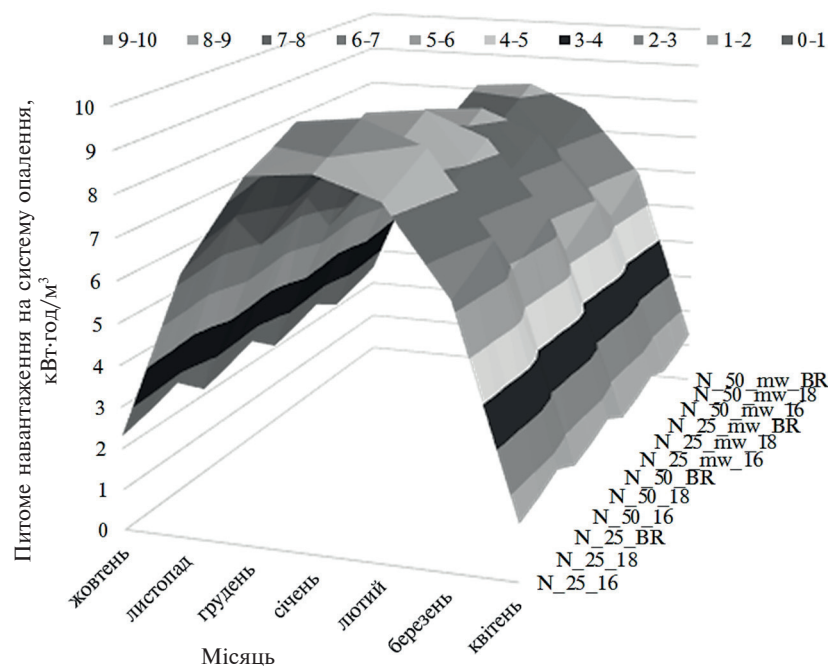


Рис. 7. Питома помісячна енергопотреба на опалення для різних теплоінерційних особливостей зовнішніх огорожень, орієнтованих на північ, і глибин зниження температури в неробочі години

(лютий, який характеризується підвищеною сонячною активністю серед зимових місяців).

Збільшення глибини провалу в неробочі години значно збільшує відсоток економії, але для забезпечення нормативної температури повітря в робочі години потрібно завищити запас потужності в 1,5 раза.

Наведений вище аналіз проводили за умови розрахунку енергопотреби, орієнтуючись на температуру внутрішнього повітря в кімнаті. При енергетичному аналізі будівлі потребу в опаленні потрібно розраховувати з урахуванням умов комфортності.

## Висновки

У статті розглянуто вплив переривчастих режимів опалення та динаміку зміни погодних умов на зміну умов комфортності для типових будівель України до та після термомодернізації на основі динамічних енергетичних моделей, створених у програмному продукті EnergyPlus.

Проведено аналіз зміни середньої радіаційної температури та  $PMV$  (показника теплової комфортності) для динамічної зміни параметрів докільця та різних варіантів огорожень будівлі. Встановлено, діапазон зміни  $t_r$  протягом року для різних варіантів огорожень знаходиться в межах 18–25 °С, а  $PMV$  як основного показника

теплового комфорту – від  $-0,5$  до  $0$ . Цей аналіз демонструє широкий діапазон зміни об'єктивних параметрів і показників теплового комфорту, а також вказує на можливість зменшення енергоспоживання за рахунок зниження температури повітря в приміщенні у період високих значень середньої радіаційної температури.

Проаналізовано вплив зниження температури у неробочі години на показники теплового комфорту. Встановлено що зниження температури на 4 °С зумовлює зниження  $PMV \leq -0,5$  для Пн-орієнтації, що відповідає пониженню до III категорії будівлі щодо забезпечення комфортних умов відповідно до ДСТУ Б EN 15251:2011 (погіршує умови перебування людей і не є доцільним).

Упровадження переривчастих режимів опалення дає змогу досягти економії теплової енергії близько 9–20 % залежно від орієнтації, глибини провалу і теплофізичних властивостей огороження.

Збільшення діапазону коливання навантаження на систему опалення для Пд-орієнтації пояснюється додатковими теплонадходженнями від сонця в зону кімнати, а також тим, що періоди переривчастого відключення опалення характерні для початку та кінця опалювального сезону. Для Пд-орієнтації тривалість періоду опалення менша в середньому на 20 днів.



Дані по *PMV* дають можливість мати кількісну характеристику забезпечення умов комфортності (від  $-0,5$  до  $0,5$ ). Таким чином, отримані результати дають змогу прогнозувати умови комфортності для можливих експлуатаційних ситуацій в умовах мінливості внутрішнього та зовнішнього середовища, наприклад зниження температури внутрішнього повітря у приміщеннях з урахуванням орієнтації приміщень та індексу теплового комфорту *PMV*.

Практична цінність одержаних результатів може полягати в програмуванні контролерів за операційною температурою приміщень (комплексний показник температури внутрішнього повітря та радіаційної температури), що дає

змогу забезпечити умови комфорту та знизити енергоспоживання в години високої радіаційно температури (години пікової сонячної активності). Додаткових досліджень потребує визначення фактичної середньорадіаційної температури приміщень для реалізації подібної схеми управління системою кліматконтролю.

Перспективи досліджень полягають у прогнозуванні рівня опалення залежно від індексу теплового комфорту *PMV*.

Запропонована методика може бути використана для уточненого аналізу будівель інших геометричних, теплофізичних характеристик, особливостей розташування та експлуатації.

## References

- [1] M. Prek and V. Butala, "Principles comparison between Fanger's thermal comfort model and human exergy loss", *Energy*, vol. 138, pp. 228–237, 2017. doi: 10.1016/j.energy.2017.07.045
- [2] F.R.D' Ambrosio Alfano *et al.*, "Povl Ole Fanger's impact ten years later", *Energy and Buildings*, vol. 152, pp. 243–249, 2017. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.07.052
- [3] M. Prek, "Exergy analysis of thermal comfort", *Int. J. Exergy*, vol. 1, no. 3, 303–315, 2004. doi: 10.1504/IJEX.2004.005559
- [4] M. Prek, "Thermodynamical analysis of human thermal comfort", *Energy*, vol. 31, no. 5, pp. 32–43, 2006. doi: 10.1016/j.energy.2005.05.001
- [5] M. Prek and V. Butala, "Principles of exergy analysis of human heat and mass exchange with the indoor environment", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 53, pp. 25–26, 2010. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.08.003
- [6] M. Shukuya *et al.*, "Human-body exergy balance and thermal comfort", Draft Report for IEA/ECBCS/Annex49, 2009, pp. 20–38.
- [7] M. Shukuya. *Exergy: Theory and Applications in the Built Environment*. Berlin, Germany: Springer, 2013.
- [8] M. Shukuya, "Exergetic aspect of human thermal comfort and adaptation", in *Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia*. Singapore: Springer, 2018, pp. 123–129. doi: 10.1007/978-981-10-8465-2\_12
- [9] M.A. Juusela and M. Shukuya, "Human body exergy consumption and thermal comfort of an office worker in typical and extreme weather conditions in Finland", *Energy and Buildings*, vol. 76, pp. 249–257, 2014. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.02.067
- [10] K. Isawa, "Human body exergy balance: numerical analysis of an indoor thermal environment of a passive wooden room in summer", *Buildings*, vol. 5, pp. 1055–1069, 2015. doi: 10.3390/buildings5031055
- [11] R. Forgiarini *et al.*, "A review of human thermal comfort in the built environment", *Energy and Buildings*, vol. 105, pp. 178–205, 2015. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.07.047
- [12] N.A. Buyak *et al.*, "Buildings energy use and human thermal comfort according to energy and exergy approach", *Energy and Buildings*, vol. 146, pp. 172–181, 2017. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.04.008
- [13] V.I. Deshko *et al.*, "Influence of subjective and objective thermal comfort parameters on building primary fuel energy consumption", *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, pp. 383–386, 2018. doi: 10.14419/ijet.v7i4.3.19838
- [14] D. Zhao *et al.*, "Interaction effects of building technology and resident behavior on energy consumption in residential buildings", *Energy and Buildings*, vol. 134, pp. 223–233, 2017. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.10.049
- [15] G. Happle *et al.*, "A review on occupant behavior in urban building energy models", *Energy and Buildings*, no. 174, pp. 276–292, 2018. doi: 10.1016/j.enbuild.2018.06.030
- [16] K.U. Ahn and C.S. Park, "Correlation between occupants and energy consumption", *Energy and Buildings*, vol. 116, pp. 420–433, 2016. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.01.010
- [17] P.X.W. Zou *et al.*, "A mixed methods design for building occupants' energy behavior research", *Energy and Buildings*, vol. 166, pp. 239–249, 2018. doi: 10.1016/j.enbuild.2018.01.068
- [18] B.F. Balvedi *et al.*, "A review of occupant behaviour in residential buildings", *Energy and Buildings*, vol. 174, pp. 495–505, 2018. doi: 10.1016/j.enbuild.2018.06.049
- [19] *EnergyPlus Energy Simulation Software* [Online]. Available: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>
- [20] P. Fanger, "Assessment of man's thermal comfort in practice", *British J. Industrial Med.*, vol. 30, pp. 313–324, 1973.

- [21] *International Weather for Energy Calculations* [Online]. Available: [https://energyplus.net/weather-location/europe\\_wmo\\_region\\_6/UKR](https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR)
- [22] V.I. Deshko and I.Y. Bilous, "Modeling of heating space mode", *Power engineering, Economics, Technique, Ecology*, no. 3, pp. 97–104, 2016.

В.И. Дешко, И.Ю. Белоус, Н.А. Буюк

#### ВЛИЯНИЕ ПЕРЫВИСТЫХ РЕЖИМОВ ОТОПЛЕНИЯ НА ДИНАМИКУ ЭНЕРГОПОТРЕБНОСТИ И УСЛОВИЯ КОМФОРТНОСТИ ДЛЯ ЗДАНИЙ С РАЗНЫМ УРОВНЕМ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ

**Проблематика.** На сегодняшний день становятся актуальными вопросы повышения энергоэффективности зданий и одновременного обеспечения надлежащего качества микроклимата при условии изменения параметров окружающей среды.

**Цель исследования.** Анализ энергоэффективности здания как энергетической системы при применении динамического энергетического моделирования с учетом взаимосвязи показателей теплового комфорта, тепловой защиты и параметров микроклимата помещений при условии прерывистого отопления.

**Методика реализации.** Для исследования энергетических характеристик здания были созданы динамические имитационные модели комнаты на базе программного продукта EnergyPlus. Для оценки уровня теплового комфорта применена энергетическая модель теплообмена человека с окружающими предметами, основанная на уравнениях теплового баланса для человеческого тела.

**Результаты исследования.** Получены графические зависимости изменения показателей теплового комфорта и параметров микроклимата при условии регулирования и изменения параметров окружающей среды для отопительного периода. Определена удельная энергопотребность на отопление для различных теплоинерционных особенностей ограждений и глубин снижения температуры в нерабочие часы, а также для различных теплоинерционных особенностей внешних ограждений, ориентированных на юг и север. Установлены значения экономии тепловой энергии при снижении температуры в нерабочие часы.

**Выводы.** Установлено, что снижение температуры на 4 °C обуславливает снижение  $PMV \leq -0,5$  для северной ориентации, что ухудшает условия пребывания людей и не является уместным. Определено, что внедрение прерывистых режимов отопления позволяет достичь экономии тепловой энергии на 16–25 % в зависимости от ориентации, глубины провала и теплофизических свойств ограждения. Увеличение диапазона колебания нагрузки на систему отопления для южной ориентации объясняется дополнительными теплопоступлениями от солнца в зону комнаты, а также тем, что периоды прерывистого отключения отопления характерны для начала и конца отопительного сезона. Для южной ориентации продолжительность периода отопления меньше в среднем на 20 дней.

**Ключевые слова:** энергопотребность; тепловой комфорт; прогнозируемая средняя оценка теплоощущения человека; средняя радиационная температура; операционная температура.

V.I. Deshko, I.Y. Bilous, N.A. Buyak

#### INFLUENCE OF PERIODIC HEATING MODES ON THE DYNAMICS OF ENERGY NEED AND HUMAN THERMAL COMFORT FOR BUILDINGS WITH DIFFERENT THERMAL PROTECTION

**Background.** At present, the issue of increasing energy efficiency of buildings and simultaneously ensuring the proper quality of microclimate subject to environmental parameter changes is becoming topical.

**Objective.** The purpose of the paper is energy efficiency analysis as an energy system in the application of dynamic energy modeling, taking into account the relationship of thermal comfort indicators, thermal protection and microclimate parameters of premises under periodic heating.

**Methods.** Dynamic simulation models based on the EnergyPlus software were created to study the building's energy performance. To estimate the level of thermal comfort, an energy model of human heat transfer with surrounding objects based on the equations of human body thermal balance is used.

**Results.** The graphic dependences of changes in the parameters of thermal comfort and microclimate parameters subject to regulation and changes in environmental parameters for the heating period are obtained. The specific energy demand for heating for the various heat-inertia features of the safety screens and depths of the temperature lowering during non-working hours, as well as for various heat-inertia features of the external fencing oriented on the S and the N is determined. The values of thermal energy savings are set at lower temperatures during non-working hours.

**Conclusions.** It is established that the decrease of temperature by 4 °C causes decrease of  $PMV \leq -0.5$  for the Northern orientation, worsening conditions of people's stay and is not appropriate. It is determined that the introduction of periodic heating modes allows achieving thermal energy savings of 16–25%, depending on the orientation, notch depth and the thermophysical properties of the safety screen. The increase in the range of fluctuations of the load on the heating system for the Southern orientation is due to additional heat inputs from the sun to the room area. The increase is also explained by the fact that periods of periodic shutdown of heating are characteristic for the beginning and end of the heating season. For the Southern orientation, the duration of the heating period is less than an average of 20 days.

**Keywords:** energy demand; thermal comfort; predicted mean vote; average radiant temperature; operating temperature.

Рекомендована Радою інституту  
енергозбереження та енергоменеджменту  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
10 квітня 2019 року

Прийнята до публікації  
05 вересня 2019 року