УДК 620.91: 697.1 DOI 10.31548/energiya2020.01.077

# ОЦІНЮВАННЯ ДИНКАМІКИ ЕНЕРГОПОТРЕБИ БУДІВЕЛЬ МАСОВОЇ ЗАБУДОВИ З УРАХУВАННЯМ ЕКСЕРГЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕПЛОВОГО КОМФОРТУ

***В. І. Дешко, доктор технічних наук, професор***

***І. Ю. Білоус, кандидат технічних наук, старший викладач***

***Н. А. Буяк, кандидат технічних наук, асистент***

***М. В. Гурєєв, студент магістратури***

***Національний технічний університет України***

***«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***

*E-mail:*biloys_inna@ukr.net

**Анотація.** *Для країн пострадянського простору, для яких характерні будівлі масової забудови, забезпечення умов комфорту з мінімізацією енергоспоживання є основною задачею сьогодення. Ефективне використання енергоносіїв в будівлях потребує інструментів для управління споживанням. Рівень опалення залежить від великого числа факторів, значна частина з яких має мінливий характер у часі, тому для забезпечення умов комфорту та якісного використання енергії доцільним є використання динамічного моделювання енергетичних характеристик будівлі. У роботі створено групу репрезентативних приміщень для будівель масової забудови та проведено динамічне моделювання енергетичних характеристик для температурного режиму повітря в приміщеннях $t_{int}$ 20 та 22 °С, що є типовою температурою для житлових та соціальних об'єктів, а також проведено уточнюючі модельні розрахунки енергопотреби на опалення при комфортній температурі $t_{com}$ у програмному середовищі Energy Plus. Регресійна модель для визначення комфортної температури створена на основі ексергетичного підходу (ексергетична модель теплового комфорту), що є актуальним дослідженням сьогодення та дозволяє якісно оцінити споживання ексергії людським тілом та оцінити оптимальні умови теплового комфорту, які залежать від теплофізичних властивостей огороджень, орієнтації, середньої радіаційної темпеератури тощо.*

*Авторами встановлено, що енергопотреба на опалення розрахована для умов $t_{int}$=20°С або $t_{com}$ майже не відрізняються в річному розрізі, але врахування добових коливань середньорадіаційної температури дозволяє підібрати графік зміни навантаження на систему опалення з урахуванням тепловідчуттів людини та орієнтації приміщень за сторонами світу. Аналогічні дослідження для умов $t_{int}$=22 °С та $t_{com}$, показують, що комфортна температура повітря $t_{com}$ буде проходити нижче $t_{int}$=22 °С протягом всього опалювального сезону та дозволить не лише*

*забезпечити умови комфорту, але й досягти економії. Для приміщень Пн орієнтації енергопотреба зменшується на 12 %, для Пд – на 19 %.*

**Ключові слова:** ***енергопотреба, умови комфорту, динамічне моделювання, комфортна температура, енергетичні характеристики будівель***

**Актуальність. У** державній політиці значна увага приділяється сфері енергоефективності будівель, де зменшення споживання енергоносіїв та підвищення комфортних умов праці є актуальними науково-практичними задачами [1]. Враховуючи, що основна складова сплати за енергоносії, що витрачаються на функціонування будівлі, є витрати на опалення. Відповідно до діючого у стандартах України квазістаціонарного підходу визначення енергоспоживання будівлі розрахунок проводять за умови підтримання певного нормативного рівня температури внутрішнього повітря, що визначається залежно від призначення [2]. Тепловий комфорт людини залежить від сукупності характеристик, таких як термічний опір одягу, метаболізм (активність), відносна вологість, середня радіаційна температура, внутрішня та зовнішня температура повітря, сонячні теплонадходження, рівень опалення, положення людини в кімнаті тощо. На відміну від стаціонарного підходу розрахунки енергопотреби на основі динамічного моделювання проводяться на базі програмного продуту Energy Plus (37 %), TRNSYS (35 %), DOE-2 (16 %) та інших [3], і у комбінації з моделями комфортних тепловідчуттів людини [4] дозволяють враховувати вплив зміни в навколишньому середовищі і в потребах людини при визначенні рівня енергоспоживання.

Якість теплового комфорту визначається на основі показників PMV (прогнозовані середні тепловідчуття людини) та PPD (прогнозований процент незадоволених тепловим середовищем), розрахунок яких детально представлений у відповідних державних та міжнародних стандартах [5, 6]. В основі цих стандартів лежить модель теплового комфорту людини, що будована на основі енергетичного балансу між поверхнею людського тіла та оточуючими предметами, розроблена Фангером [7].

Практичне застосування цих стандартів вказує на необхідність розширення поняття теплового комфорту із врахуванням різних будівель [8], а також слід

враховувати і те, яким чином цей комфорт забезпечується. Адже належний мікроклімат у приміщеннях може забезпечуватися за допомогою джерел теплоти, що споживають різні за якістю енергоресурси. У цьому контексті для порівняння та вибору найкращої альтернативи доцільним є застосування ексергетичного аналізу. Ексерегтичний підхід дозволяє якісно оцінити потоки енергії від різних джерел теплоти і є новим інструментом для аналізу системи теплопостачання будівлі. У контексті актуальності оцінки якості потоків енергії, що надходять до будівлі, розроблено модель для аналізу будівлі як єдиної ексергетичної системи, що поділяє ланцюг перетворення енергії/ексергії на такі складники: огороджувальні конструкції, повітря у кімнаті, випромінювання та контроль, розподіл, нагромадження, генерація, первинне енергоперетворення [9, 10]. Використання ексергетичного підходу у сфері теплового комфорту людини є актуальним завданням, детально висвітленим у чисельних дослідженнях [9–15].

Особливістю ексергетичної моделі теплового комфорту є те, що в її основі лежить енергетична модель, розроблена A. Gagge [16], що враховує терморегуляцію людини. У працях M. Shukuya [15] представлено вступ до ексергетичної концепції, ексергетичний баланс людського тіла для типових та перехідних умов. Аналіз впливу теплового захисту огороджувальних конструкцій на споживання ексергії людським тілом [13] для різних кліматичних умов засвідчив, що споживання ексергії людським тілом зменшується на 0,6 %, 6,4 %, 10,1 % та 35,9 % для теплого/волого, помірного, теплого/сухого та холодного типів клімату відповідно, за умови зростанні теплового захисту. Проаналізовано процес терморегуляції людини в різних типах клімату із застосуванням ексергетичної моделі людини [12]. Використано метод ексергетичного аналізу для пошуку оптимального співвідношення між температурою повітря в кімнаті і середньою радіаційною температурою для фінляндських офісних працівників у літній період, адже відповідно до досліджень, саме ексергетичний підхід до теплового комфорту забезпечує визначення умов для найвищої продуктивності праці.

В основі ексергетичної моделі лежить дво-вузлова термопсихологічна модель людини, розроблена A. P. Gagge [16]. Людське тіло розглядається як відкрита термодинамічна система за сталих умов. Така модель враховує втрати теплоти за рахунок дихання, випаровування вологи, а також втрати теплоти за рахунок конвекції та випромінювання та механізм терморегуляції людини.

**Мета дослідження –** підвищення ефективності управління використанням енергії на основі деталізації показників в динамічних сіткових моделях з врахуванням часової мінливості погодних та експлуатаційних факторів, а також параметрів комфортності.

**Матеріали і методи дослідження.** Метод, який розвинув Фангер, адаптований у стандарті ISO Standard 7730, ґрунтується на рівняннях теплового балансу для людського тіла [5]:

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

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0{,}03353 \cdot PMV^4 + 0{,}2179 \cdot PMV^2)}, \qquad (1)$$

де $M$ – ступінь метаболізму, Вт/м$^2$; $W$ – ефективна механічна робота, Вт/м$^2$; $H$ – втрати теплоти випромінюванням (sensitiveheatlosses), Вт/м$^2$; $E_c$ – теплообмін шляхом випаровування зі шкіри, Вт/м$^2$; $C_{res}$ – теплообмін конвекцією, під час дихання, Вт/м$^2$; $E_{res}$ – теплообмін випаровуванням під час дихання.

Основною проблемою розрахунків за цим методом є те, що температура поверхні одягу не є відомою наперед, і визначається методом ітерацій з рівняння теплового балансу для шару одягу [7].

Метод визначення *PMV* (Predicted Mean Vote) передбачає зв'язок між оптимальними тепловими умовами, використовуючи рівняння теплового балансу для людського тіла для стаціонарних умов і рейтинг забезпечення теплового комфорту. Показник *PMV* обґрунтований на базі великої кількості експериментів, однак тут не прописаний механізм терморегуляції, що є суттєвим при розрахунку теплообміну людини.

У статті [4] запропонована регресійна модель (2) теплового комфорту, що дозволяє оцінити вплив суб'єктивних та об'єктивних параметрів, яка була створена на основі ексергетичної моделі [7]

$$t_{comf} = -0.67 \cdot t_r - 0.0048 \cdot T_0 - 0.35 \cdot M - 86.46 \cdot I_{cl} + 0.113 \cdot \varphi + 66.53 \qquad (2)$$

де $t_r$ – середня радіаційна температура, ºС; $T_0$ – температура зовнішнього повітря, К; $M$ – швидкість вироблення метаболізму на одиницю поверхні Du Bois, Вт/м$^2$; $I_{clo}$ – термічний опір одягу, м$^2$·°С/Вт; $\varphi$ – внутрішня відносна вологість, %.

Скоригований коефіцієнт детермінації $R^2_{adjusted} = 0.97$. $F$-критерій $F_{observed}$=49, $F_{table}$=3.35. Оскільки $F_{observed} > F_{table}$, рівняння регресії є статистично значущим.

Особливості проведення досліджень енергетичних характеристик приміщення на основі динамічного моделювання полягають в тому, що будівля розглядається як теплоенергетична система (рис. 1).

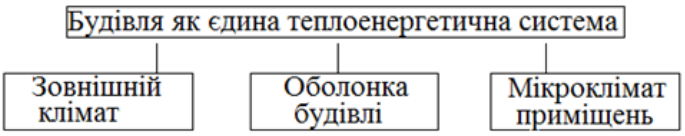



**Рис. 1. Будівля як теплоенергетична система**

Моделювання динамічних енергетичних характеристик приміщення проводилося з використання програмного комплексу Energy Plus (рис. 2).

В основу математичної постановки покладено систему рівнянь теплообміну між повітрям в приміщенні та зовнішнім середовищем за рахунок трансмісійної теплопередачі та радіаційного теплообміну огороджень з врахуванням нестаціонарних процесів акумуляції енергії в елементах конструкцій будівлі [17].

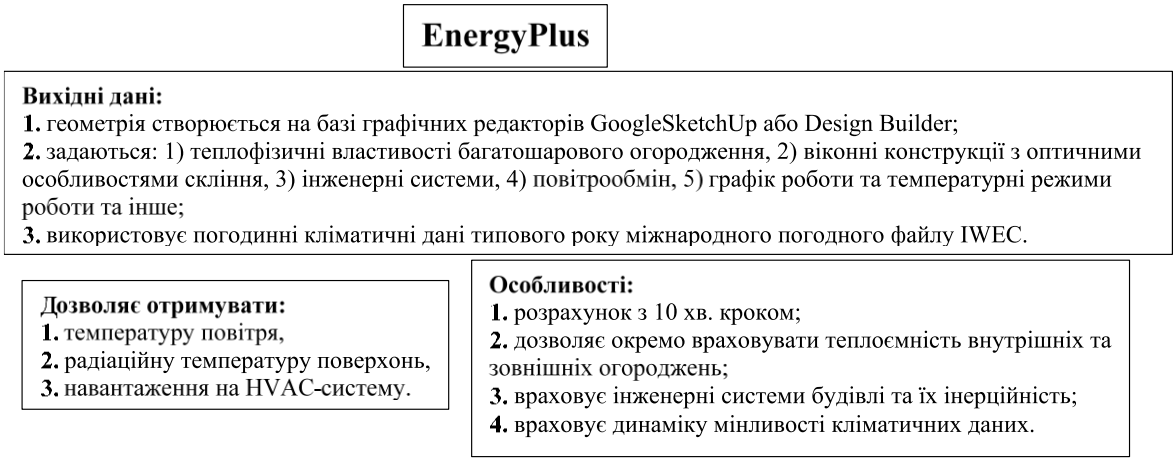



**Рис. 2. Методика динамічного визначення енергетичних характеристик приміщень**

*Граничні умови та обмеження.* Моделювання енергетичних характеристик будівлі в програмному середовищі Energy Plus на основі $t_{com}$ призводить до зміни седьорадіаційної температури, що була використана при розрахунку $t_{com}$ за допомогою (2). Для уточнення отриманих на першій ітерації результатів $t_{comreg}$ необхідно, наприклад, на основі методу половинного ділення, проводити корегування задання температури повітря в приміщенні для визначення $t_{com}$ у Energy Plus та середньорадіаційної температури. Відмінність результатів моделювання середньораційної температури на першій та на другій ітерації становить до 2 °С у середньому.

**Результати досліджень та їх обговорення.** У роботі проведено динамічне моделювання енергетичних характеристик приміщення з однією зовнішньою стіною з світлопрозорим елементом конструкції.

Розглядалися репрезентативні кімнати будівель масовій забудові періоду 80-х років ($R_{зс}$=0.8 м$^2$К/Вт, $R_в$=0.17 м$^2$К/Вт). Коефіцієнт засклення 0.4. Створені імітаційні моделі кімнати розглядалися для приміщень Пд та Пн орієнтації. Імітаційні моделі кімнати створені на базі програмного комплексу Energy Plus, який заснований на принципі побудови вузлових моделей. Динамічна модель дозволяє проводити розрахунок з 10 хв кроком, враховує теплоінерційні особливості кожного

огородження окремо, сонячні теплонадходження, що надходять в зону кімнати, мають дифузний характер. Геометрія репрезентативних приміщень створювалась в графічному редакторі Google Sketchup.

Погодинне моделювання енергетичних характеристик приміщень протягом опалювального сезону проведено для кліматичних умов м. Києва на основі даних міжнародного кліматичного файлу типового року IWEC [18]. У міжнародному кліматичному файлі погоди IWEC наведено: температуру сухого термометра, відносну вологість, швидкість та напрям вітру, барометричний тиск, пряму (виражена через direct normal) та розсіяну сонячну радіацію на горизонтальну поверхню (diffuse horizontal) тощо. Погодний файл IWEC представлений в розширенні "EPW", для легкої синхронізації з імітаційною моделлю на основі Energy Plus. Динамічна енергетична модель дозволяє отримувати погодинні значення температури повітря та поверхонь у зоні кімнати, середню радіаційну температуру, величину сонячних теплонадходжень у зону кімнати, рівень опалення для різних режимів роботи з врахуванням інерційних особливостей огороджень в умовах динамічної зміни параметрів зовнішнього середовища.

Отримані енергетичні характеристики будівлі кімнати на основі динамічного моделювання в програмному середовищі Energy Plus були використанні для визначення комфортної температури за рівнянням (2). Проводилися моделювання енергетичних характеристик будівель для температури повітря в приміщеннях 20 ºС та 22 ºС (температурний режим для ДНЗ та лікарень).

Для приміщень Пд орієнтації через значну кількість сонячних теплонадходжень в зону кімнати ($Q_{sol}$), зростає середня радіаційна температура, що в свою чергу призводить до пониження $t_{com}$, протилежний ефект приманний для приміщень Пн орієнтації.

В таблиці 1 наведено результати динамічного моделювання для визначення річної енергопотреби приміщеньдля різних температурних режимів та забезпечення для них комфортної температури.

**1. Енергопотреба будівлі на опалення**

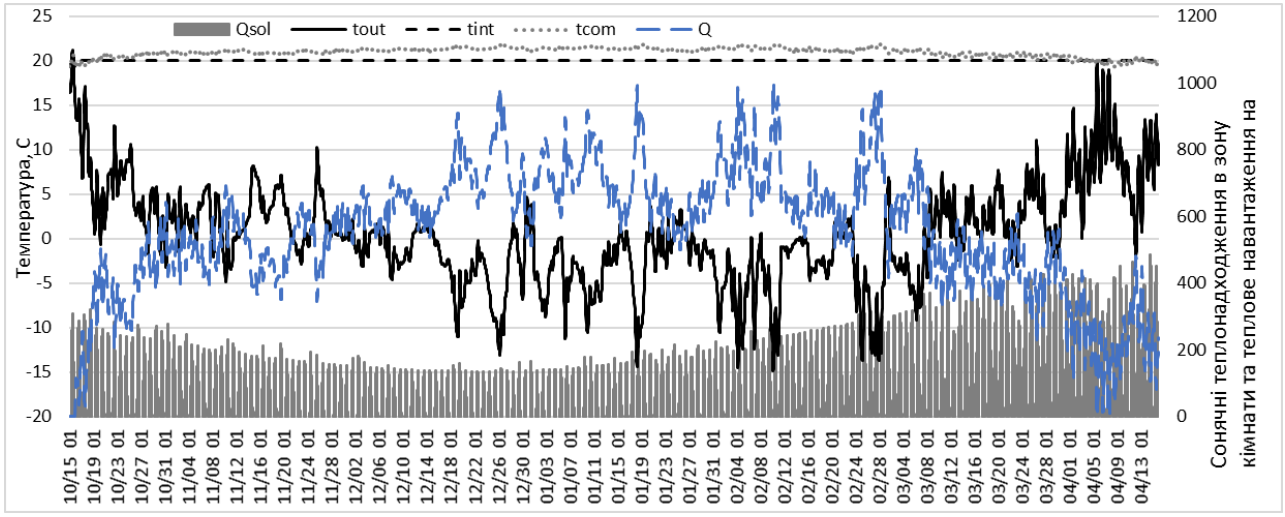
| Характер приміщення | | *Q*, кВт·год | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | *tint* | *tcom* | *tint* | *tcom* |
| | | Північ (Пн) | | Південь (Пд) | |
| Температурний режим | 20 | 2456.5 | 2595.7 | 1790.3 | 1827.1 |
| | 22 | 2745.5 | 2426.5 | 2062.4 | 1679.5 |

Енергопотреба для приміщень Пд орієнтації на 25 % нижче порівняно з приміщення Пн орієнтації. За температурного режиму при внутрішній температури повітря 20 °С, комфортна температура буде дещо вища нормативної. Звідси випливає, що регулювання рівня опалення відповідно до умов комфорту призведе до збільшення енергопотреби майже на 6 % для Пн та 2 % - для Пд.

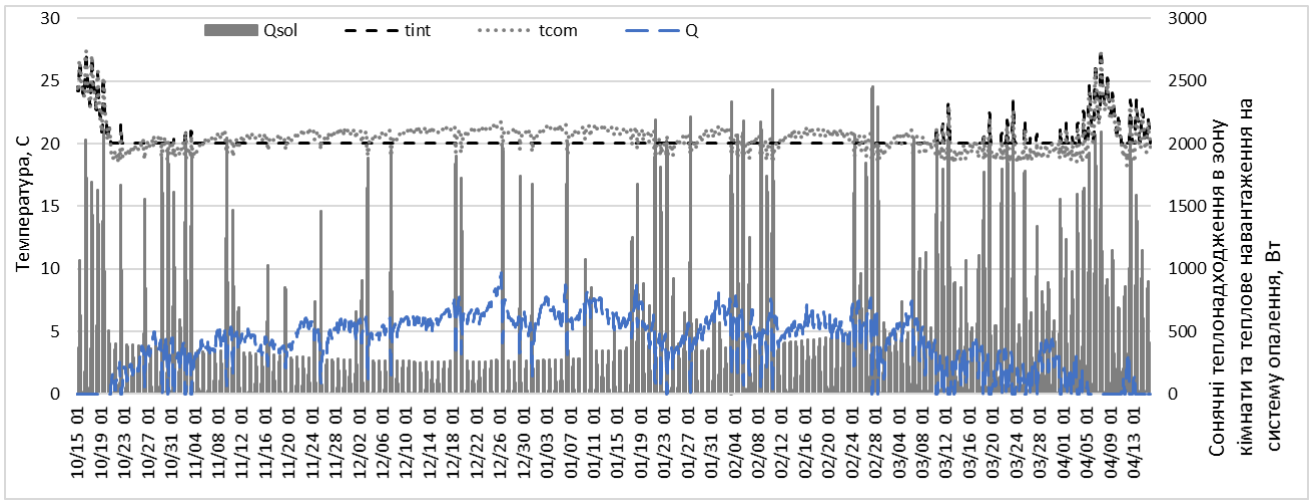
Для температурного режиму 22 °С, комфортна температура буде нижча нормативної (зворотний ефект), що призведе до зменшення енергопотреби на 12 % для Пн орієнтації та 1 9% - Пд. Для кутових приміщень, що становлять меншу загальної кількості приміщень будівлі, збільшення енергопотреби може бути до 20 % (для Пн орієнтації).

На рис. 3 наведено аналіз динаміки зміни енергетичних характеристик приміщень з однією зовнішньою стіною орієнтованою на Пн (*а*) та Пд (*б*) для температурних умов 20 °С для опалювального періоду. Зовнішня температура повітря не залежить від орієнтації будівлі та наведена на рис. 3, *а*.

На відміну від приміщень Пн орієнтації (рис. 3, *а*) для Пд (рис. 3, *б*) характерні більш помітні добові коливання комфортної температури температури ($t_{com}$), що пояснюється сонячними теплонадходженнями в денний час доби. Для Пн величина добових коливань становить до 1 °С, Пд – до 4 °С. Значення комфортної температури для Пн орієнтації, як правило, перевищують температуру повітря приміщень, для Пд орієнтації – коливаються біля температури повітря. До того ж в період міжсезоння під впливом зростання сонячних теплонадходжень та температури внутрішніх огороджень – різниця між температурою повітря і комфортною $t_{com}$ в Energy Plus збільшується, а регулювання комфорту за $t_{com}$ в Energy Plus потребує охолодження.




*а*




*б*

**Рис. 3. Енергетичні характеристики приміщення з однією зовнішньою стіною орієнтованою на Пн (*а*) та Пд (*б*),**

де $t_{int}$=20 – нормативна внутрішня температура повітря 20 °С; $t_{com}$ – комфортна температура повітря, отримана на основі ексергетичної моделі (формула 2), °С; $t_{out}$ – зовнішня температура повітря, °С; $Q_{sol}$ – теплонадходження в зону кімнати, Вт; $Q$ – навантаження на систему опалення, Вт; ММ/ДД ЧЧ – місяць/день/ час.

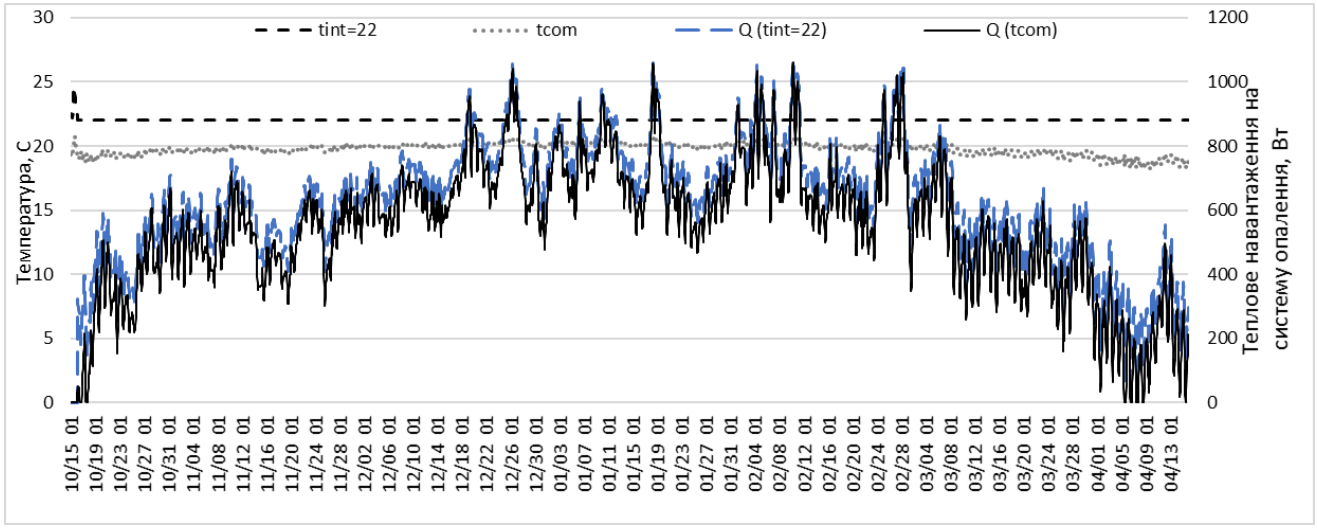
Енергопотреба на опалення розрахована за нормативною внутрішньою температурою повітря $t_{int}$=20 °С та за $t_{com}$. У періоди максимальної сонячної активності комфортна температура повітря знижується, що призводить до зниження

навантаження на систему опалення (частина днів у лютому та березні) або часткового вимкнення системи опалення в періоди міжсезоння (жовтень, квітень).

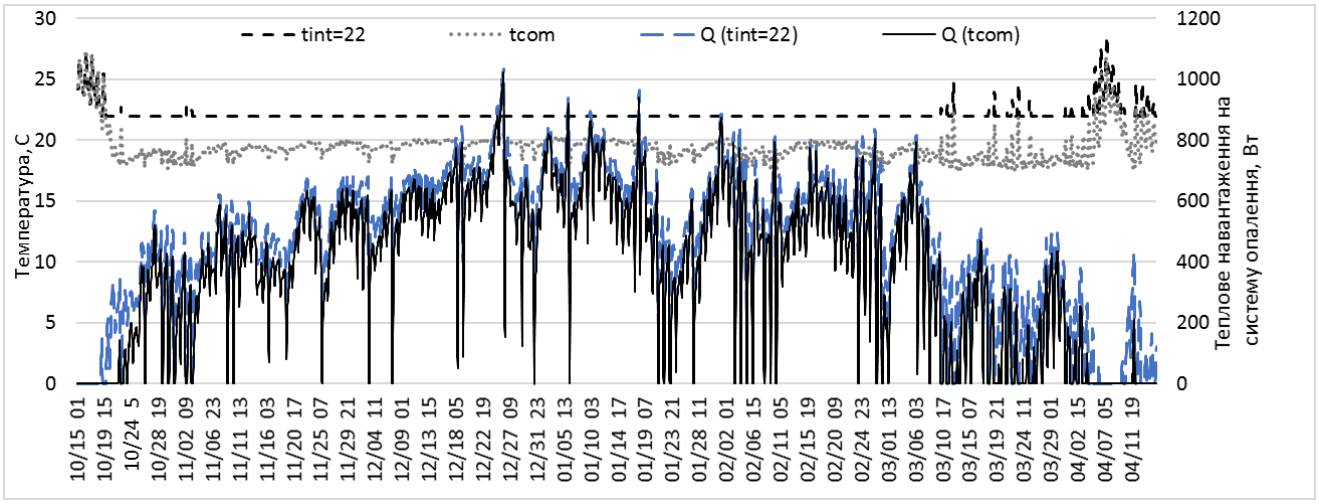
У розглянутих випадках енергопотреба кімнати залишається приблизно на одному рівні (відхилення становить біля 5 % для всіх розглянутих варіантів), але регулювання за $t_{com}$ дозволить враховувати тепловідчуття людини та орієнтацію приміщень при регулюванні системи опалення.

У роботі проведенно аналогіні дослідження за умови нормативної температури повітря в приміщеннях $t_{int}$=22 °С, що відповідно до стандартів України характерно для дошкільних дитячих навчальних закладів (ДНЗ), лікарень. На рис.4 наведено аналіз енергетичних характеристик приміщень з однією зовнішньою стіною і огороджень, характерних для будівель масової забудови, орієнтація кімнат на Пн (*а*) та Пд (*б*). Сонячні теплонадходження в зону кімнати для Пн та Пд орієнтації співпадають з графіками на рис. 3, *а* та 3, *б*, відповідно. Зміна зовнішньої температури наведена рис. 3, *а*.

Для такої комбінації вхідних параметрів комфортна температура повітря $t_{com}$ буде проходити нижче $t_{int}$=22 °С протягом усього опалювального сезону та дозволить не лише забезпечити умови комфорту, але й досягти економії при регулюванні опалення по комфортній температурі. Для приміщень Пн орієнтації енергопотреба зменшується на 12.6 %, для Пд – на 19 %. Для Пд орієнтації спостерігаються короткочасні відключення або зниження навантаження на систему опалення, що пояснюється короткостроковою піковою сонячною активністю протягом доби, так само як і на рис. 3, *б*.




*а*




*б*

**Рис. 4. Енергетичні характеристики приміщення з однією зовнішньою стіною орієнтованою на Пн (*а*) та Пд (*б*),**

де $t_{int}$=22 – нормативна внутрішня температура повітря 22 °С; $Q$ – навантаження на систему опалення при внутрішній температурі 22 °С та $t_{com}$, Вт.

**Висновки і перспективи.** У статті проведено визначення енергопотреби на опалення для будівель різного призначенні за умови дотримання нормативного теплового режиму приміщень та визначеної комфортної температури на основі розробленої модифікованої регресійної моделі. Використано регресійну модель, що дозволяє оцінити вплив суб'єктивних та об'єктивних параметрів та показників мікроклімату на комфортну температуру повітря в приміщенні. Отримане значення

комфортної температури дозволяє більш точно розраховувати енергопотребу будівлі, яка може бути використана на етапі проектування та експлуатації опалювальних систем.

1) У роботі створено динамічні математичні моделі групи репрезентативних приміщень різної орієнтації, геометричних особливостей огороджень для дослідження енергетичних характеристик на основі програмного середовища Energy Plus.

2) На основі ексергетичної моделі (2) та результатів динамічного моделювання енергетичних характеристик проведено розрахунок комфортної температури, що використаний для подальших уточнень енергетичних характеристик будівель на основі Energy Plus.

3) Встановлено, що енергопотреба на опалення розрахована для умов $t_{int}$=20° С та $t_{com}$ (отриманої за рівнянням (2)) майже не відрізняються в річному розрізі, але врахування добових коливань середньорадіаційної температури дозволяє підібрати графік зміни навантаження на систему опалення з врахуванням тепловідчуттів людини та орієнтації приміщень за сторонами світу.

4) Проведені аналогічні моделювання енергопотреби на опалення для умов $t_{int}$=22 °С та $t_{com}$. Встановлено, що комфортна температура повітря $t_{com}$ буде проходити нижче $t_{int}$=22 °С протягом всього опалювального сезону та дозволить не лише забезпечити умови комфорту, але й досягти економії. Для приміщень Пн орієнтації енергопотреба зменшується на 12 %, для Пд – на 19 %.

## Список літератури

1. Шовкалюк М. М., Білоус І. Ю. Аналіз енергетичних і математичних показників і балансів навчального закладу з розробкою енергетичних заходів. Науково-практичний журнал "Екологічні науки". 2014. №1(5). С. 108-115.

2. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні [Уведений вперше; чинний від 2015.01.01]. К. Мінрегіонбуд України, 2016. 205 с.

3. Mukhtar A., Yusoff M.Z., Ng K.C. The potential influence of building optimization and passive designstrategies on natural ventilation systems in underground

buildings: The stateof the art. Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 92. 2019. P. 2-18.

4. Deshko V., Buyak N., Voloshchuk V. Reference state for the evaluation of energy efficiency of the system “heat source - human -building envelope”. Proceedings Of Ecos 2019 - The 32nd International Conferenceon Efficiency, Cost, Optimization, Simulation And Environmental Impact Of Energy Systems June 23-28, 2019, Wroclaw, Poland.

5. ДСТУ Б EN ISO 7730: 2011. Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту. Київ: Мінрегіон України, 2012. 74 с.

6. ДСТУБ EN 15261:2012. Розрахунок параметрів мікроклімату. Київ: Мінрегіон Україна, 2013.

7. Fanger P. Assessment of man's thermal comfort in practice. British Journal of Industrial Medicine 1973; 30: 313-324.

8. Fabbri K. Thermal comfort evaluation in kindergarten: PMV and PPD measurement through datalogger and questionnaire. Buildingand Environment 2013; 3. P. 202–214.

9. Schmidt D. Design of Low Exergy Buildings – Method and Pre-Design Tool. The International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings 2004; 3. P. 1-47.

10. Дешко В. І., Буяк Н. А., Білоус І. Ю. Вибір теплового захисту та джерела тепла із врахуванням комфортних умов у будівлі. Журнал "Вісник КНУТД". 2015. №5(90). С. 71-80.

11. Prek M. Exergy analysis of thermal comfort. International Journal of Exergy 2004;1. P. 303-315.

12. Tokunaga K., Shukuya M. Human-body exergy balance calculation under un-steady state conditions. Building and Environment 2011; 46. P. 2220-2229.

13. Dovjak M., Shukuya M., Krainer A. Connective thinking of building envelope – Human body exergy analysis. International Journal of Heat and Mass transfer 2015; 90. P. 1015-1025.

14. Schweiker M., Kolarik J., Dovjak M., Shukuya M. Unsteady-state human-body exergy consumption rate and its relation to subjective assessment of dynamic thermal environments. Energy and Buildings 2016; 116. P. 164-180.

15. Shukuya M. Exergy: Theory and Applications in the Built Environment. Berlin: Springer; 2013. 374 p.

16. Gagge A. Standart predictive index of human response to the thermal environment. ASRAE Transactions 1971; 77. P. 247-262.

17. Deshko V., Sukhodub I., Bilous I. Mathematical models for determination of specific energy need for heating used in Ukraine. Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES). 2018. Vol. 1. P. 13-25.

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

## References

1. Shovkaliuk M. M., Bilous I. Yu. (2014). Analiz enerhetychnykh i matematychnykh pokaznykiv i balansiv navchalnoho zakladu z rozrobkoiu enerhetychnykh zakhodiv [Analysis of energy and mathematical indicators and balances of the educational institution with the development of energy measures]. Scientific-practical journal "Environmental sciences, 1(5), 108-115.

2. DSTU B A.2.2-12: 2015. Enerhetychna efektyvnist' budivel'. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannya pry opalenni, okholodzhenni, ventylyatsiyi, osvitlenni ta haryachomu vodopostachanni [Energy efficiency of buildings. Method of calculation of energy heating, cooling, ventilation, lighting and hot water]. Kyiv: Minrehion Ukrayiny, 205.

3. Mukhtar A., Yusoff M. Z., Ng K. C. (2019). The potential influence of building optimization and passive designstrategies on natural ventilation systems in underground buildings: The stateof the art. Tunnelling and Underground Space Technology, 92, 2-18.

4. Deshko V., Buyak N., Voloshchuk V. (2019). Reference state for the evaluation of energy efficiency of the system “heat source - human -building envelope”. Proceedings Of Ecos 2019 - The 32nd International Conferenceon Efficiency, Cost, Optimization, Simulation And Environmental Impact Of Energy Systems June 23-28, 2019, Wroclaw, Poland.

5. DSTU B EN ISO 7730: 2011. Ergonomika teplovogo seredovyshha. Analitychne vyznachennya ta interpretaciya teplovogo komfortu na osnovi rozraxunkiv pokaznykiv PMV i PPD i kryteriyiv lokalnogo teplovogo komfortu [Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort based on calculations of PMV and PPD and local thermal comfort criteria]. Kyiv: Minregion Ukrayiny; 2012.

6. DSTU B EN 15261: 2012. Rozraxunok parametriv mikroklimatu [Calculation of microclimate parameters]. Kyiv: Minregion Ukrayiny; 2013.

7. Fanger, P. (1973). Assessment of man's thermal comfort in practice. British Journal of Industrial Medicine, 30, 313-324.

8. Fabbri, K. (2013). Thermal comfort evaluation in kindergarten: PMV and PPD measurement through datalogger and questionnaire. Buildingand Environment, 3, 202–214.

9. Schmidt, D. (2004). Design of Low Exergy Buildings – Method and Pre-Design Tool. The International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings, 3, 1-47.

10. Deshko V., Buyak N., Bilous I. (2015). Analiz enerhetychnykh i matematychnykh pokaznykiv i balansiv navchalnoho zakladu z rozrobkoiu enerhetychnykh zakhodiv [Choice of thermal protection and heat source, taking into account comfortable conditions in the building]. Bulletin of KNUTD, 5(90), 71-80.(ukr)

11. Prek, M. (2004). Exergy analysis of thermal comfort. International Journal of Exergy, 1, 303-315.

12. Tokunaga, K., Shukuya, M. (2011). Human-body exergy balance calculation under un-steady state conditions. Building and Environment, 46, 2220-2229.

13. Dovjak M., Shukuya M., Krainer A. (2015). Connective thinking of building envelope – Human body exergy analysis. International Journal of Heat and Mass transfer, 90, 1015-1025.

14. Schweiker, M., Kolarik, J., Dovjak, M., Shukuya, M. (2016). Unsteady-state human-body exergy consumption rate and its relation to subjective assessment of dynamic thermal environments. Energy and Buildings,116, 164-180.

15. Shukuya, M. (2013). Exergy: Theory and Applications in the Built Environment. Berlin: Springer, 374.

16. Gagge, A. (1971). Standart predictive index of human response to the thermal environment. ASRAE Transactions, 77, 247-262.

17. Deshko, V., Sukhodub, I., Bilous, I. (2018). Mathematical models for determination of specific energy need for heating used in Ukraine. Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES), 1, 13-25.

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

## ОЦЕНКА ДИНКАМИКИ ЭНЕРГОПОТРЕБНОСТЕЙ ЗДАНИЙ МАССОВОЙ ЗАСТРОЙКИ С УЧЕТОМ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОГО КОМФОРТА

***В. И. Дешко, И. Ю. Белоус, Н. А. Буяк, М. В. Гуреев***

**Аннотация.** *Для стран постсоветского пространства для которых характерны здания массовой застройки, обеспечение условий комфорта с минимизацией энергопотребления является основной задачей сегодняшнего дня. Эффективное использование энергоносителей в зданиях требует инструментов для управления потреблением. Потребление энергии на отопление зависит от большого числа факторов, значительная часть из которых имеет динамический характер во времени, поэтому для обеспечения условий комфорта и качественного использования энергии целесообразно использование динамического моделирования энергетических характеристик здания. В работе использована группа репрезентативных помещений для характеристик зданий массовой застройки и проведено динамическое моделирование энергетических характеристик для температурного режима воздуха в помещениях 20 и 22 ºС, что является типичным для жилых и социальных объектов, а также проведены уточняющие модельные расчеты энергопотребности на отопление при комфортной температуре $t_{com}$ в программной среде Energy Plus. Регрессионная модель для определения комфортной температуры создана на основе эксергетического подхода (эксергетическая модель теплового комфорта). Этот актуальный подход позволяет качественно оценить потребление эксергии человеческим телом и оптимальные условия теплового комфорта, зависящие от теплофизических свойств ограждений, ориентации, средней радиационной температуры и других характеристик.*

*Авторами установлено, что энергопотребности на отопление, рассчитанные для условий $t_{int}$=2 0°C или $t_{com}$, почти не отличаются в годовом разрезе, но учет суточных колебаний средней радиационной температуры позволяет подобрать*

*график изменения нагрузки на систему отопления с учетом теплоощущения человека и ориентации помещений по сторонам света. Аналогичные исследования для условий $t_{int}$=22 °С и $t_{com}$, показывают, что комфортная температура воздуха $t_{com}$ будет находиться ниже $t_{int}$=22 °С в течение всего отопительного сезона и позволит не только обеспечить условия комфорта, но и достичь экономии. Для помещений С-ориентации энергопотребность уменьшается на 12 %, для Ю - на 19 %.*

**Ключевые слова:** ***энергопотребность, условия комфорта, динамическое моделирование, комфортная температура, энергетические характеристики зданий***

## ENERGY NEED DYNAMICS ESTIMATION OF MASS-BUILDING BUILDINGS CONSIDERINGTHE EXERGETIC MODEL OF HEAT COMFORT

***V. Deshko, I. Bilous, N. Buyak, M. Gureev***

**Abstract.** *For post-Soviet countries characterized by mass-building buildings, providing comfort while minimizing energy consumption is a major challenge today. Efficient use of energy in buildings requires tools to manage consumption. Heating consumption depends on a large number of factors, many of which are time-varying, so it is advisable to use dynamic modeling of the energy performance of a building to provide comfort and quality energy use. A group of representative premises models for the characteristics of mass-building buildings was developed in the work. Dynamic modeling of energy characteristics was carried out for the air temperature regime in the premises of 20 and 22oC, which is typical for residential and social facilities. As well as refined model calculations of heating energy consumption for comfort air temperature $t_{com}$ were done in the Energy Plus software environment. Regression model for determining the comfort temperature is created on the basis of exergy approach (exergy model of thermal comfort).This actual approach allows qualitative estimate of exergy consumption by the human body and the optimal conditions of thermal comfort, depending on the thermophysical properties of enclosures, orientation, mean radiation temperature and other characteristics.*

*The authors found that the energy need for heating calculated for the conditions $t_{int}$=20 °С or $t_{com}$ are almost indistinguishable in the annual section. However, the daily fluctuations of the mean radiation temperature stocktaking allows choosing a schedule of changes in the load on the heating system, taking into account the heat sensation of the person and the orientation of the premises outside. Similar studies for $t_{int}$=22 °С and $t_{com}$ indicate that the comfortable air temperature $t_{com}$ will pass below $t_{int}$=22 °С throughout the heating season and will not only provide comfort but also achieve savings. For Northern orientation, energy consumption is reduced by 12 %, for Southern orientation - by 1 9%.*

**Key words:** ***energy need, comfort conditions, dynamic modeling, comfort temperature, buildings energy performance***