

УДК 620.98: 658.24

ДЕШКО В.І, д-р техн.наук, професор

Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ

БУЯК Н.А., канд. техн.наук

Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ

## ЕНЕРГЕТИЧНІ ТА ЕКСЕРГЕТИЧНІ МОДЕЛІ ТЕПЛОВОГО КОМФОРТУ ЛЮДИНИ

*Проаналізовано стандарти щодо розрахунків та оцінки параметрів та показників теплового комфорту. Особлива увага акцентована на моделях теплового комфорту, що лежать в основі даних підходів. Проведено порівняння енергетичної та ексергетичної моделей теплового комфорту. Обґрунтовано доцільність застосування ексергетичної моделі теплового комфорту для проектування будівель з належним рівнем теплового комфорту.*

**Ключові слова:** тепловий комфорт, температура повітря у приміщенні, середня радіаційна температура, PMV, PPD, метаболізм, термічний опір одягу людини.

*Проанализированы стандарты расчетов и оценки параметров и показателей теплового комфорта. Особое внимание акцентировано на моделях теплового комфорта, лежащие в основе данных подходов. Проведено сравнение энергетической и эксергетической моделей теплового комфорта. Обоснована целесообразность применения эксергетической модели теплового комфорта для проектирования зданий с должным уровнем теплового комфорта.*

**Ключевые слова:** тепловой комфорт, температура воздуха в помещении, средняя радиационная температура, PMV, PPD, метаболизм, термическое сопротивление одежды человека.

*The standards for calculations and estimation of parameters and parameters of thermal comfort are analyzed. Particular attention is focused on the models of thermal comfort, which underlie these approaches. A comparison of energy and exergy models of thermal comfort has been carried out. The expediency of using the exergent model of thermal comfort for designing buildings with an appropriate level of thermal comfort is substantiated.*

**Keywords:** thermal comfort, indoor temperature, average radiation temperature, PMV, PPD, metabolism, clothers isolations.

У світовій практиці значну увагу приділяють питанню енергоефективності будівель. Важливим аспектом при зниженні енергоспоживання є забезпечення обраного рівня теплового комфорту. Питання теплового комфорту визначають такі стандарти, що побудовані на енергетичній моделі теплового комфорту Фангера [1] та на базі адаптивного підходу [2]. Підвищення якості теплового комфорту в будівлях пов'язане із конкретними показниками теплового комфорту, значення яких визначають відповідні стандарти. В основі сучасних стандартів лежить енергетична модель людини. Для оцінки умов комфортності використовують такі типи шкал: PMV (прогнозована середня

оцінка тепловідчуттів людини) та PDD (прогнозований процент незадоволених) [3], на базі яких визначаються три зони комфортності (А, В і С) [4]. Індекс PMV визначається на основі виразу теплового балансу людського тіла, враховуючи внутрішню генерацію та теплообмін з навколишнім середовищем, а індекс PDD дає кількісну оцінку – очікуваний відсоток незадоволених людей конкретним температурним середовищем. Такі індекси використовуються в країнах західної Європи, в Америці існує своя шкала комфортності [5]. Параметри мікроклімату у приміщеннях та комфортність умов в Україні визначають на основі таких документів:

1. ДСТУ Б EN 15251:2011 Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики будівель [6]. Цей стандарт наводить приклади рекомендованих категорій для проектування будівель із механічним опаленням та охолодженням. Виділяють чотири категорії будівель, залежно від значення *PMV*, а також обґрунтовано сфери застосування цих категорій, залежно від рівня очікувань та тривалості перебування людини. 2. ДСТУ Б EN 15261:2012. Розрахунок параметрів мікроклімату [7]. 3. ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 Ергономіка теплового середовища. 4. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників *PMV* і *PPD* і критеріїв локального теплового комфорту [3]. Цей стандарт дає аналітичне визначення показників теплового комфорту, критеріїв локального теплового дискомфорту. Свої переваги має і ексергетична модель теплового комфорту, що ґрунтується на першому та другому законі термодинаміки і дозволяє врахувати механізм терморегуляції. Особливості даної моделі окреслені у дослідженнях [8–10]. У контексті розвитку підходу щодо аналізу потоків ексергії від джерела теплоти до огорожувальних конструкцій [11–15], слід використовувати саме ексергетичну модель теплового комфорту, що висвітлено у наступній роботі [16]. Використання комплексного підходу потребує застосування відповідної моделі для визначення відповідності рівня забезпечення теплового комфорту та енергетичних показників системи, саме тому в даній роботі оцінено переваги та особливості ексергетичної моделі теплового комфорту.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є порівняння та розробка комплексної енергетичної та ексергетичної моделі теплового комфорту для аналізу ефективності енергетичної системи будівлі.

Для досягнення поставленої цілі були сформульовані наступні завдання:

- порівняння енергетичної та ексергетичної моделей теплового комфорту;
- розробка моделі теплового комфорту для оцінки впливу суб'єктивних та об'єктивних параметрів теплового комфорту на споживання первинного палива енергетичною системою будівлі;
- обґрунтувати доцільність застосування ексергетичної моделі теплового комфорту при проектуванні будівель та визначення рівня теплового комфорту у цьому випадку.

**Енергетична та ексергетична моделі теплового комфорту, їх особливості.** Енергетична модель теплового комфорту людини, що лежить в основі підходу представленого у стандарті EN ISO 7730 представлена наступними співвідношеннями [1]:

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,28) \cdot [(M - W) - H - E_c - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - E_{res}] \quad (1)$$

$$t_{cl} = [35,7 - 0,028 \cdot (M - W)] - I_{cl} \cdot [3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 274)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)]$$

(2)

де  $PMV$  – прогнозована середня оцінка тепловідчуттів людини;  $M$  – ступінь метаболізму, Вт/м<sup>2</sup>;  $W$  – ефективна механічна робота, Вт/м<sup>2</sup>;  $H$  – втрати теплоти випромінюванням, Вт/м<sup>2</sup>;  $E_c$  – теплообмін шляхом випаровування зі шкіри, Вт/м<sup>2</sup>;  $E_{res}$  – теплообмін конвекцією, під час дихання, Вт/м<sup>2</sup>;  $E_{res}$  – теплообмін випаровуванням під час дихання, Вт/м<sup>2</sup>;  $f_{cl}$  – фактор, що враховує площу поверхні одягу;  $I_{cl}$  – термічний опір одягу, (м<sup>2</sup> · °C) / Вт;  $t_a$  – температура повітря, °C;  $h_c$  – коефіцієнт конвективного теплообміну, Вт/(м<sup>2</sup> · K).

Для оцінки споживання ексергії людським тілом обрано стаціонарну ексергетичну модель, що не враховує накопичення ексергії в ядрі та оболонці. В основі ексергетичної моделі людського тіла – енергетичний баланс [17]. Систему терморегуляції описано шляхом розрахунку температурних сигналів від оболонки та ядра і визначення потоку крові [17]. Ексергетичний баланс для людського тіла [18]:

$$\begin{aligned} Ex_m + Ex_{gen,cr} + Ex_{gen,sk} + Ex_{inh,air} + Ex_{abs,sk-cl} = \\ = Ex_{rad,dc} + Ex_{conv} + Ex_{exh,air} + Ex_{sw,ha} + Ex_{stored,cr} + Ex_{stored,sk} + Ex_{cons} \end{aligned} \quad (3)$$

де  $Ex_m$  – ексергія теплоти, що обумовлена обміном речовин, Вт/м<sup>2</sup>;  $Ex_{gen,cr}$  – ексергія рідини, що генерується в ядрі за рахунок метаболізму, Вт/м<sup>2</sup>;  $Ex_{gen,sk}$  – ексергія рідини, що генерується в оболонці за рахунок метаболізму, Вт/м<sup>2</sup>;  $Ex_{inh,air}$  – ексергія вологого повітря, що вдихає людина, Вт/м<sup>2</sup>;  $Ex_{abs,sk-cl}$  – ексергія випромінювання, що поглинається шкірою та одягом людини, Вт/м<sup>2</sup>;  $Ex_{rad,dc}$  – ексергія випромінювання від поверхні тіла, Вт/м<sup>2</sup>;  $Ex_{conv}$  – ексергія, що передається конвекцією повітрю, Вт/м<sup>2</sup>;  $Ex_{exh,air}$  – ексергія вологого повітря, що видихає людина, Вт/м<sup>2</sup>;  $Ex_{sw,ha}$  – ексергія водяної пари, що появляється за рахунок секрету шкіри, Вт/м<sup>2</sup>;  $Ex_{stored,cr}$  – ексергія, що накопичується в ядрі, Вт/м<sup>2</sup>;  $Ex_{stored,sk}$  – ексергія, що накопичується в оболонці, Вт/м<sup>2</sup>;  $Ex_{cons}$  – ексергія, що споживається людським тілом, Вт/м<sup>2</sup>.

Відповідно до ексергетичного підходу людський організм функціонує найкраще за умови мінімального споживання чи деструкції ексергії людським тілом, тому основним завданням є визначення мінімального значення споживання ексергії людським тілом та відповідної йому температури повітря у кімнаті при сталих інших параметрах мікроклімату. Апробація ексергетичної моделі людини представлена у роботі [19], дані кореспондуються з джерелом [11].

**Результати дослідження.** Залежність споживання ексергії від середньої радіаційної температури та температури повітря у кімнаті для параметрів системи [16] відображена на рис.1. Споживання ексергії людським тілом змінюється залежно від параметрів мікроклімату у кімнаті, від параметрів людини.

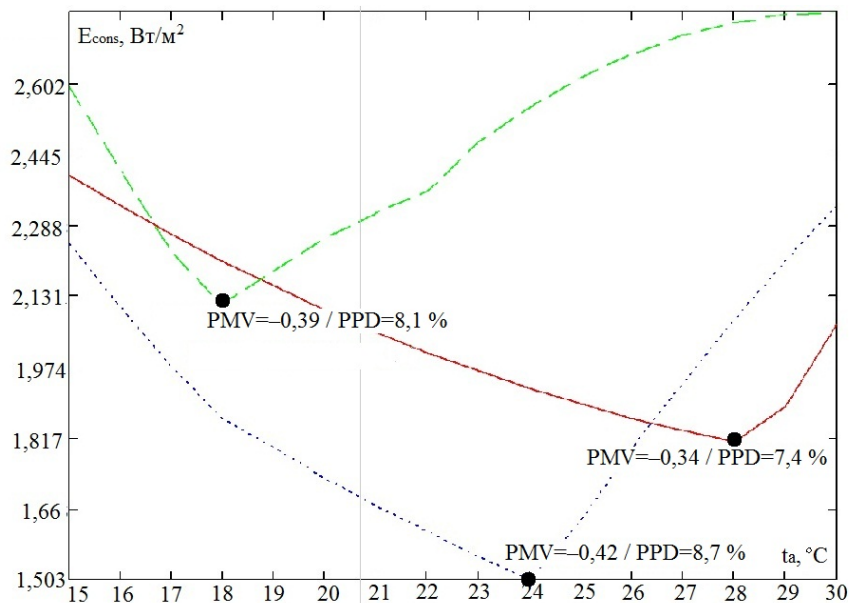


Рис. 1. Залежність споживання ексергії людським тілом  $E_{cons}$  від температури повітря у кімнаті  $t_a$ , для різних значень середньої радіаційної температури:  $t_r$ : — для  $t_r=15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ..... — для  $t_r=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; — — для  $t_r=28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ● — мінімум споживання ексергії

Різні криві відповідають різним значенням середньої радіаційної температури приміщення, інші параметри – незмінні. За низької  $t_a$  споживання ексергії зростає за рахунок тремтіння людського тіла, при зростанні температури в кімнаті  $E_{cons}$  досягає свого мінімуму і зростає за рахунок охолодження поверхні шкіри шляхом випаровування вологи. На рис. 1 для точок, що відповідають мінімуму споживання ексергії, оцінено показник  $PMV$  та  $PPD$ .  $PPD$  – це прогнозований процент незадоволених даним середовищем, основні показники тепловідчуттів людини відповідно до міжнародного стандарту EN ISO 7730. Значення  $PMV$  знаходиться в межах  $-0,34$  –  $0,42$ . У [19] мінімум споживання ексергії відповідає значенню  $PMV=-0,611$  (однак там температура відліку ексергії приймалася рівною температурі повітря у кімнаті). Проведені порівняння залежності  $t_a(t_r)$  для різних моделей теплового комфорту представлені на рис. 2. Відмінність між температурою внутрішнього повітря, яка потрібна для забезпечення комфортних умов при ексергетичному підході та при  $PMV=0$ , лежить у діапазоні  $0,8$ – $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  при різних значення  $t_r$ . Відмінність між розробленою моделлю та моделлю [20], полягає у тому, що прогнозована середня оцінка тепловідчуттів людини визначається на основі емпіричної моделі, а в основах визначення мінімуму споживання ексергії лежить підхід, що ґрунтується на другому законі термодинаміки і полягає у мінімізації деструкцій ексергії. Порівняння значень середньоквадратичного відхилення комфортної температури від базової для різних моделей теплового комфорту людини показали найнижче значення середньоквадратичного відхилення відповідає ексергетичній моделі теплового комфорту і рівне  $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Отже, забезпечення комфортних умов відповідно до ексергетичного підходу дозволяє знизити температуру повітря, в середньому на  $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а отже – зекономити споживання енергоресурсів.

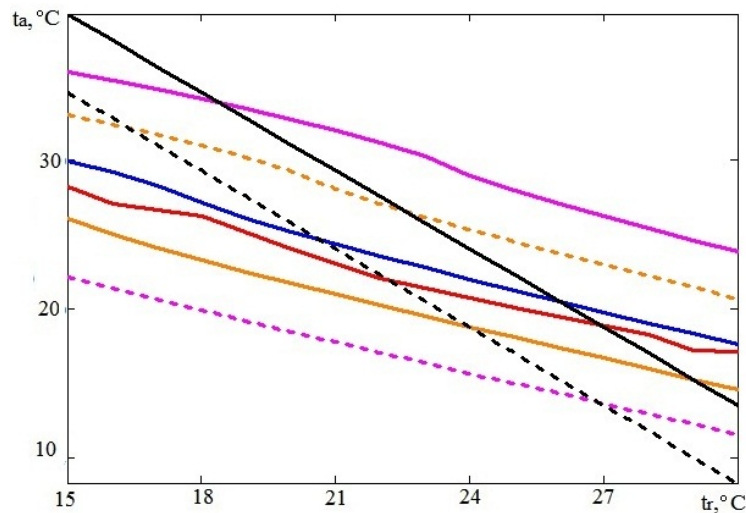


Рис. 2. Залежність середньої радіаційної температури  $t_r$  повітря від температури повітря у кімнаті  $t_a$  для різних моделей теплового комфорту: — мінімум споживання ексергії; — — —  $PMV=0$ ; - - -  $PMV=0,5$ ; — — —  $PMV=-0,5$ ; — — —  $PMV=1$ ; - - -  $PMV=-1$ ; — — — діапазон комфортних умов за Богословським [21]

**Висновки.** Розроблено стаціонарну модель теплового комфорту людини з урахуванням особливості її використання, як складової у енергетичній системі будівлі, на основі енергетичного та ексергетичного підходу, визначено мінімальне споживання ексергії людським тілом і температуру повітря у кімнаті, що йому відповідає, при різних значеннях середньої радіаційної температури для температури зовнішнього повітря, що дорівнює 273 К. Встановлено, що прогнозована середня оцінка тепловідчуттів людини для таких умов при мінімальному споживанні ексергії людським тілом знаходиться в діапазоні -0,34 – -0,42.

Представлено порівняння залежності комфортної температури повітря від середньої радіаційної температури для різних моделей теплового комфорту. Дані параметри є важливими при комплексному аналізі та проектуванні енергетичної системи будівлі. Комфортна температура внутрішнього повітря є вихідною величиною для проектування та експлуатації джерела теплоти. А середня радіаційна температура дозволяє врахувати вплив огорожувальних конструкцій.

## ЛІТЕРАТУРА

1. ISO Standard 7730. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. International Standard Organization, Geneva, 2005.
2. CEN, Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings: Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics, EN 15251, European Committee for Standardization, Brussels, 2007.
3. 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. [Чинний від 2013-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2012. 74 с.

4. Orosa J. Research on General Thermal Comfort Models. *European Journal of Scientific Research*, 2009. V. 27. P. 217–227.

5. Hakan O. Nilsson. *Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models*. URL: <http://www.arbetslivsinstitutet.se> (дата звернення 26.06.2017).

6. ДСТУ Б EN 15251: 2011. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики будівель. [Чинний від 2013-07-01]. Київ: Мінрегіон України, 2012. 71 с.

7. ДСТУ Б EN 15261: 2012. Розрахунок параметрів мікроклімату. [Чинний від 2013-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2012. 81 с.

8. Prek, M. (2005). Thermodynamic analysis of human heat and mass transfer and their impact on thermal comfort. *International journal of heat and mass transfer*, 48, 731–739.

9. Dovjak, M., Shukuya, M., & Krainer, A. (2011). Connective thinking of building envelope – Human body exergy analysis. *International Journal of Heat and Mass transfer*, 90, 1015–1025.

10. Tokunaga, K., Shukuya, M. (2011). Human-body exergy balance calculation under unsteady state. *Building and Environment*, 46, 2220–2229.

11. Simone, A., Kolarik, J. & Iwamatsu, T. et al. (2011). A relation between calculated human body exergy consumption rate and subjectively assessed thermal sensation. *Energy and Buildings*, 43, 1–9.

12. Lohani, S.P. Schmidt, D. (2010). Comparison of energy and exergy analysis of fossil plant, ground and air source heat pump building heating system. *Renewable Energy*. Vol. 35, p 1275–1282.

13. Yan, Z. (2013). Exergy analysis of the building heating and cooling system from the power plant to the building envelop with hourly variable reference. *Energy and Buildings*, 56, 94–99.

14. Balta T., Kalinci Y, Hepbasli A. Evaluating a low exergy heating system from the power plant through the heat pump to the building envelope. *Energy & Buildings*, 2008. V. 40. P. 141–147.

15. Bi Y., Wang X., Liu Y. and other. Comprehensive exergy analysis of a ground-source heat pump system for both building heating and cooling modes. *Applied Energy*, 2009. V. 86. P. 2560–2565.

16. Buyak N.A., Deshko V. I., Sukhodub I.O. Buildings energy use and human thermal comfort according to energy and exergy approach. *Energy and buildings*, 2017. V.146. P. 50–60.

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

18. Tokunaga, K., Shukuya, M. (2011), Human-body exergy balance calculation under unsteady state. *Building and Environment*, 46, 2220–2229.

19. Deshko, V., Buyak, N. (2016). A model of human thermal comfort for analyzing the energy performance of buildings. *Eastern European journal of enterprise technologies*, 82, 42–47.
20. Fanger P. O. Assessment of man's thermal comfort in practice. *British Journal of Industrial Medicine*, 1973. V 30. P. 313–324.
21. Богословский В. Н, Сканава А. Н. Отопление. Москва: Стройиздат, 1991. 735 с.