

УДК 620.98

ВПЛИВ ТЕПЛООВОГО ЗАХИСТУ БУДІВЛІ НА ПОКАЗНИКИ ТЕПЛООВОГО КОМФОРТУ

Д-р техн. наук, проф. В.І. Дешко, аспір. Н.А. Буяк

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЗДАНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ ТЕПЛООВОГО КОМФОРТА

Д-р тех. наук, проф. В.И. Дешко, аспир. Н.А. Буяк

INFLUENCE OF BUILDING ENVELOPE ON THERMAL COMFORT INDICATORS

Doct. of techn. Sciences V.I. Deshko, postgraduate N.A. Buyak

У даній роботі проаналізовано різні моделі теплового комфорту. Серед яких виділяють наступні: адаптивна модель, модель PMV та модель, в основі якої – мінімум споживання ексергії людським тілом. Визначено вплив на показники теплового комфорту покращення теплового захисту огорожуючих конструкцій будівлі. Для аналізу обрано віртуальну модель кімнати та людини. Проаналізовано вплив теплового захисту одягу, температури внутрішнього, зовнішнього повітря на відчуття комфорту людиною

***Ключові слова:** адаптивна модель, тепловий комфорт, прогнозована середня оцінка якості внутрішнього середовища, прогнозований процент незадоволених температурним середовищем.*

В данной работе проанализированы различные модели теплового комфорта. Среди которых выделяют следующие: адаптивная модель, модель PMV и модель, в основе которой - минимум потребления эксергии человеческим телом. Определено влияние на показатели теплового комфорта улучшения тепловой защиты ограждающих конструкций здания. Для анализа избрана виртуальная модель комнаты и человека. Проанализировано влияние тепловой защиты одежды на ощущение комфорта человеком

***Ключевые слова:** адаптивная модель, тепловой комфорт, прогнозируемая средняя оценка качества внутренней среды, прогнозируемый процент недовольных температурной средой.*

The purpose of this paper is to introduce and to analyze different models of thermal comfort. Among them are the following: adaptive model, model PMV (based on the heat balance of the human body) and model based on minimum exergy consumption of human body. The virtual model of room and person was chosen. We analyze thermal comfort in the room with different thermal performance of the building envelope which satisfies standards of 80- year, modern and improved. Thermal comfort sensation of person weared in winter and summer clothes was analysed The author singles out the Predicted Percentage Dissatisfied of thermal environment as the main criteria of thermal comfort. This paper analyzes influence of thermal protection of the building envelope and person clothes on thermal comfort. It is shown that for the considered conditions the degree of sensitivity to various terms parameters of comfort model sequentially decreases in the number: internal air temperature, average radiation temperature, metabolic rate, clothing insulation, thermal protection of the building, the outside temperature.

Research has shown that to ensure comfortable conditions required to raise the temperature of internal air in the room. And increasing thermal performance of building envelope mainly affects on reduction of energy consumption.

Keywords: *adaptive model, thermal comfort, Predicted mean Vote, Predicted Percentage Dissatisfied.*

Вступ. При зростанні вимог енергозбереження до будівель та з появою різних видів будівель (енергозберігаюча, екологічна та будівля з низьким споживанням ексергії, а також будівля з низьким споживанням ексергії) та систем теплопостачання особливо актуальним стає забезпечення при цьому відповідних комфортних умов перебування людини.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Використання високоефективних та сучасних джерел тепла не є достатньо ефективним у будівлях із низьким тепловим захистом, тому вибір джерела тепла, покращення чи вибір теплового захисту будівель та забезпечення комфортних умов повинен здійснюватися комплексно. У зв'язку із впровадженням нормативних документів, що стосуються енергоефективності та теплового комфорту [1,2,3], що відповідають європейським стандартам, важливим є врахування комплексу комфортних умов для будівель на стадії проектування та реновації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій Теплові умови комфортності в будівлі визначаються параметрами оточуючого середовища (температура повітря, середня радіаційна температура, відносна швидкість повітря і тиск пари в навколишньому повітрі) та людськими факторами (рівень активності й термічний опір одягу) [4]. Особливу увагу умовам комфортності приділяють вчені, що досліджують системи радіаційного опалення [5].

Українськими науковцями представлена нечітка модель комфортного повітряного середовища в житловому приміщенні, на основі якої вихідні комфортні значення температури внутрішнього повітря та відносної вологості формуються із врахуванням індивідуальних характеристик людини [6]. Комфортну швидкість руху повітря, як вихідну величину

для систем кондиціонування повітря, представлено у наступній роботі [7]. Показано вплив температурних параметрів комфортності на інтегровану вартість опалення [8, 9].

Для визначення комфортних умов у приміщенні використовують наступні моделі [10]: 1) модель 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; 2) адаптивна модель; співвідношення для стаціонарного теплового комфорту отримується на основі низки досліджень. Така модель представлена співвідношенням, між температурою повітря у приміщенні та температурою зовнішнього середовища; 3) НВх (human body exergy consumption) – метод визначає мінімальну величину споживання ексергії людським тілом, що відповідає комфортним умовам.

Системному розгляду впливу рівня теплового захисту як огорожувальних конструкцій будівлі, так і одягу та активності людини на показники комфортності приділяється мало уваги, хоча суттєве зниження рівня витрат на опалення, навіть із погіршенням комфортності, розглядається як вкрай необхідний захід при обмежених умовах енергозабезпечення в Україні.

Ексергетичний підхід до моделі теплового комфорту людини представлений у наступних роботах і в останній час отримав широке застосування [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

Отже існує необхідність визначити в комплексі вплив різних факторів зі сторони людини та будівлі на тепловий комфорт людини.

Визначення мети та задачі дослідження: Метою дослідження є визначення показників теплового комфорту, а саме прогнозованого проценту незадоволених температурним середовищем

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

(*PPD*) для будівлі із різними характеристиками теплового захисту та для людини вдягненої у літній та зимовий одяг.

Основна частина дослідження

Для визначення та дослідження показників комфорту оберемо модель дослідження – віртуальну кімнату, характеристики якої, занесені у табл.1, а

Таблиця 1. Віртуальна модель кімнати

Характеристики	Приклад А	Приклад Б	Приклад С
Площа кімнати	4×4×2,5		
Площа вікна	1,5×2,5		
Тип теплового захисту огорожуючих конструкцій	Відповідає нормам 80-их років	Відповідає сучасним нормам	Норми покращені на 30 %
Швидкість руху повітря, м/с	0,1		
Температура повітря в кімнаті $t_{vn}, ^\circ C$	20		
Відносна вологість, %	50		
Швидкість руху повітря, $\frac{m}{c}$	0,1		
Температура зовнішнього повітря $t_z, ^\circ C$	- 1,1		

Таблиця 2. Віртуальна модель людини

Характеристики	Приклад 1	Приклад 2
Швидкість обміну речовин $M, \frac{Wm}{m^2}$	58	
Коефіцієнт теплоізоляції одягу $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Wm}$	0,155 (1)	0,0775 (0,5)

Тепловий комфорт оцінюється за наступними показниками [2]:

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

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

де *PMV* – прогнозована середня оцінка якості внутрішнього середовища; *PPD* – прогнозований процент незадоволених температурним середовищем; *M* - ступінь метаболізму Вт/м²; *W* - ефективна механічна робота Вт/м²; *H* - втрати тепла теплопередачею; *E_c* - теплообмін шляхом випаровування зі шкіри;

також віртуальну модель людини (табл.2). Для аналізу обрано два варіанти одягу – зимовий і літній. Класичним літнім одягом є легкі штани, сорочка на короткий рукав і світла білизна (термічний опір 0,5 clo), а зимовим – бізнес костюм (термічний опір 1 clo) [4].

C_{res} - теплообмін конвекцією, під час дихання; *E_{res}* - теплообмін випаровуванням під час дихання.

Для визначення середньої радіаційної температури приміщення існує кілька методів: 1) метод, що враховує площу та температуру огорожуючих конструкцій [19]; 2) визначення рівневої радіаційної температури – для різного положення тіла

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

людини [20]; 3) враховується геометричний зв'язок людини зі всіма поверхнями [21]; 4) метод, що враховує зв'язок людини із

кожною поверхнею та надходження сонячної радіації [22]. Середня радіаційна температура визначається так [19]:

$$t_R = \frac{\sum_{i=1}^n F_i t_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (3)$$

де F_i - площа огорожуючої конструкції; t_i - температура огорожуючої

конструкції; n - кількість огорожуючих конструкцій;

Температура i -ї зовнішньої огорожуючої конструкції визначається так:

$$t_i = t_{vn} - \frac{t_{vn} - t_z}{R_{ok} \cdot \alpha_v} \quad (4)$$

де t_{vn} - температура повітря в кімнаті, $^{\circ}C$; t_z - температура зовнішнього повітря (в даній роботі розрахунки проводимо для найнижчої температури $=-1,1^{\circ}C$); R_{ok} - термічний опір огорожуючої конструкції, $\frac{m^2 \cdot ^{\circ}C}{Wm}$; α_v - коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкцій [23]. Температура інших огорожуючих конструкцій приймається рівною температурі повітря в кімнаті t_{vn} .

визначена радіаційна температура у приміщенні t_R . Потім за допомогою програми [24] та даних із табл. 1 та 2, розраховано прогнозований процент незадоволених температурним середовищем PPD . Результати розрахунків представлені на рис.2. Оскільки для усіх варіантів огорожуючих конструкцій $PDD > 15$, то обрану віртуальну модель кімнати можна віднести до IV категорії за якістю теплового середовища [1]. Тому потрібно підвищувати температуру внутрішнього повітря, радіаційну температуру для покращення умов перебування. Зростання термічного опору огорожуючих конструкцій зменшує відсоток незадоволених температурним середовищем від 29% до 23% – при одній зовнішній стіні і від 31,4% до 23,4% – при двох зовнішніх стінах.

Розрахунок показників теплового комфорту можна здійснювати за допомогою різних програм [24, 25]. Програма для розрахунку представлена на рис. 1, яку обрано за вищу точність розрахунків.

Для обраної моделі кімнати за допомогою співвідношень (3) та (4)

Calculation of PMV and PPD

58	M (W/m2), Metabolic energy production (58 to 232 W/m2)
0	W (W/m2), Rate of mechanical work, (normally 0)
20	Ta (C), Ambient air temperature (10-30)
22	Tr (C), Mean radiant temperature (often close to ambient air temperature)
0.1	v (m/s), Relative air velocity (0.1 to 1 m/s)
50	rh (%), Relative humidity
1.0	Icl (clo), basic clothing insulation (1 clo = 0.155 W/m2K)

PMV and PPD

PMV -3 cold to +3 hot

PPD (%)

CALCULATION READY!

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

Рис. 1 Програма для розрахунку прогнозованої середньої оцінки якості внутрішнього середовища (*PMV*) та прогнозованого проценту незадоволених температурним середовищем (*PPD*)

Оскільки найвищий процент теплового захисту огорожуючих конструкцій та підвищення термічного опору одягу зменшує *PPD*. Тому доцільно визначити чутливість функції *PPD* до зазначених факторів.

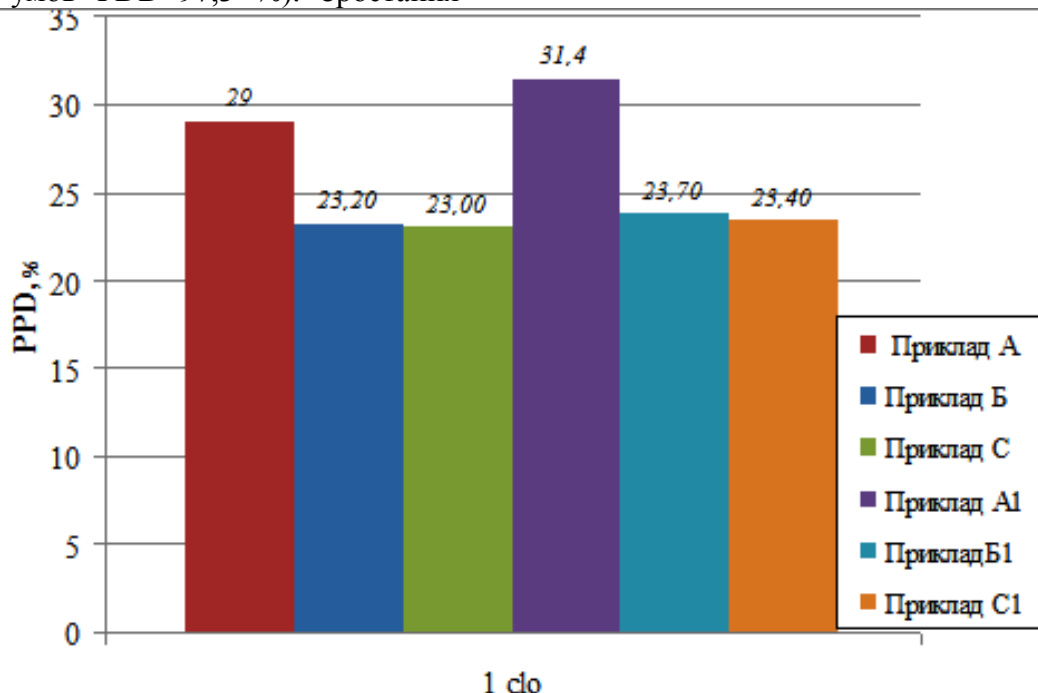


Рис.2. Значення *PPD* для віртуальної моделі кімнати

	Віртуальна модель кімнати з однією зовнішньою стіною		Віртуальна модель кімнати із двома зовнішніми стінами

Чутливість *PPD* до теплового захисту огорожуючих конструкцій та до

термічного опору одягу людини визначалась так:

$$\Omega = \frac{x_0}{y_0} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (5)$$

де Ω – чутливість функції; y – функція, чутливість якої визначається; x – параметр, до якого визначається чутливість функції; x_0 – початкове значення аргументу; y_0 – початкове значення функції.

Значення чутливостей функції *PPD* (проценту незадоволених температурним середовищем) представлені у таблиці 3. Для таких базових параметрів моделі: 1) тепловий захист будівлі відповідає нормам 80-х; 2) температура зовнішнього повітря

рівна $-1,1 \text{ }^\circ\text{C}$; 3) температура внутрішнього повітря $t_{vn} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; 4) швидкість обміну речовин $M = 58 \frac{\text{Bm}}{\text{m}^2}$. Отже найвища чутливість функції до температури внутрішнього повітря: від $-6,2$ до $-6,8$. Значний вплив на *PPD* має і радіаційна температура від $-3,29$ до $-3,46$, далі – обмін речовин від $-3,14$ до $-3,42$. Чутливість до теплоізоляції одягу є меншою від $-0,68$ до $-0,74$ і зі зростанням теплового захисту

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

огороджуючих конструкцій чутливість зростає. Ще менший вплив має тепловий захист будівлі від -0,08 – -0,11, та температура зовнішнього повітря -0,011 – -0,013. Від’ємне значення чутливостей

означає, що підвищення значення всіх показників, приводить до зниження відсотка незадоволених температурним середовищем, а отже і до покращення відчуття теплового комфорту людиною.

Таблиця 3. Значення чутливості *PPD*

Фактор	Коефіцієнт теплоізоляції одягу			Тепловий захист будівлі	$t_{in}, ^\circ C$			$t_z, ^\circ C$	Обмін речовин $M, \text{Вт/м}^2$	$t_R, ^\circ C$
	Пр. А	Пр. Б	Пр. С		Пр. А	Пр. Б	Пр. С			
Чутливість <i>PPD</i> моделі										
З однією зовнішньою стіною	-0,69	-0,74	-0,74	-0,08	-6,41	-6,79	-6,8	-0,014	-3,14	-3,46
З двома зовнішніми стінами	-0,68	-0,73	-0,74	-0,11	-6,2	-6,73	-6,78	-0,011	-3,42	-3,29

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.

В роботі проведено аналіз забезпечення комфортності в залежності від рівня таких факторів, як тепловий захист огорожувальних конструкцій будівлі і одягу людини. Представлена методика розрахунку, побудована на показниках теплового комфорту PMV та PPD, дозволяє встановити сукупність цих та інших факторів, що забезпечує потрібний рівень комфортності.

Показано, що для розглянутих умов степінь чутливості умов комфортності до різних параметрів моделі послідовно зменшується в ряду: температура внутрішнього повітря, середня радіаційна температура, швидкість обміну речовин, теплоізоляція одягу, тепловий захист будівлі, температура зовнішнього повітря.

При цьому треба враховувати можливий діапазон зміни цих величин. При низькому рівні теплового захисту огорожень вплив його зміни на умови комфортності зростає.

Проектування будівель із температурою внутрішнього повітря 20°C - не відповідає умовам комфортності, тому потрібно підвищувати температуру внутрішнього повітря, або підвищувати середньозважену радіаційну температуру, використовуючи відповідні системи опалення.

Розглянуті підходи в подальшому будуть використані при аналізі умов оптимізації енерго-економічних показників проектування та експлуатації будівлі для системи джерело енергії – будівля – людина. А також подальші дослідження полягатимуть у врахуванні впливу сонячної радіації на середньозважену радіаційну температуру та на показники комфорту.

Список використаних джерел

1. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики будівель (EN 15251:2007, IDT): ДСТУ Б EN 15251: 2011. – [чинний від 01.01.2013]. – К.: - Мінрегіон України, 2012. – 33 с. (Національний стандарт України).

2. Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту (EN ISO 7730:2011, IDT): ДСТУ Б EN ISO 7730: 2011. – [чинний від 01.07.2013]. – К.: - Мінрегіон України, 2012. – 64 с. (Національний стандарт України).
3. Енергоефективність будівель. Загальне енергоспоживання та визначення енергетичних показників (EN 15603:2012): ДСТУ Б EN 15603: 2012. – [чинний від 01.01.2014]. – К.: - Мінрегіон України, 2012. – 43 с. (Національний стандарт України).
4. Fanger P. O. Assessment of man's thermal comfort in practice // *British Journal of Industrial Medicine*. – 1973. – №30. – С. 313–324.
5. Шиванов В. В. Обеспечение теплового режима производственных помещений системами газового лучистого отопления : дис. канд.: 05.23.03 — Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение / Шиванов В. В. – Нижний Новгород, 2007. – 134 с.
6. Бабич Н.И. Нечеткая модель оценки комфортных условий при проектировании систем кондиционирования воздуха // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2013. – № 64. – С. 36-40.
7. Возняк О. Т. Вплив параметрів внутрішнього мікроклімату приміщення на теплообмін людини / О. Т. Возняк // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. – 2010. – № 662 : Теорія і практика будівництва. – С. 84–88. .
8. Дешко В. И. Влияние комфортных условий на интегрированную стоимость отопления / В. И. Дешко, Н. А. Буяк. // *Промышленная теплотехника*. – 2009. – №7. – С. 63–64.
9. Дешко В. И. Показники опалення будівель і температурні умови комфортності / В. И. Дешко, Н. А. Буяк. // *Промышленная теплотехника*. – 2010. – №1. – С. 66–70.
10. Schweiker M. Adaptive comfort from the viewpoint of human body exergy consumption. / M. Schweiker, M. Shukuya. // *Building and Environment*. – 2012. –V. 51. – P. 351–360.
11. Prek M. Exergy analysis of thermal comfort / M. Prek. // *International Journal of Exergy*. – 2004. – V. 1. –P. 303–315.
12. [Electronic Resource]. –Mode of access: URL: http://www.annex49.info/download/Annex49_HBE.pdf. – Title from screen.
13. A relation between calculated human body exergy consumption rate and subjectively assessed thermal sensation / [A. Simone, J. Kolarik, T. Iwamatsu та ін.]. // *Energy and Buildings*. – 2011. – V. 43. – P. 1–9.
14. Juusela M. A. Human body exergy consumption and thermal comfort of an office worker in typical and extreme weather conditions in Finland / M. A. Juusela, M. Shukuya. // *Energy and Buildings*. – 2014. – №76. – P. 249–257
15. Baldi M. G. Thermal Exergy Analysis of a Building / M. G. Baldi, L. Leoncini. // *Energy Procedia*. – 2014. – V. 62. – P. 723–732.
16. A novel human body exergy consumption formula to determine indoor thermal conditions for optimal human performance in office buildings / X.Wu, J. Zhao, B. W. Olesen, L. Fang. // *Energy and Buildings*. – 2013. – V. 56. – P. 48–55.
17. The use of a thermophysiological model in the built environment to predict thermal sensation: Coupling with the indoor environment and thermal sensation. // *Building and Environment*. – 2013. – V. 59. – P. 10–22.
18. Human body exergy analysis and the assessment of thermal comfort conditions / K. E.Keutenedjian Mady, M. S. Ferreira, J. I. Yanagihara, S. Oliveira. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – V. 77. – P. 577–584.
19. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях: ГОСТ 30494: 1996. – [чинний від 01.03.1999]. –М.: – Межгосударственная научно-

техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве: 1999. –13 с. (Межгосударственный стандарт).

20. Ergonomics of the thermal environment–Instruments for measuring physical quantities: BS EN ISO 7726: 2001. – [Execute Date 2001/11/6]. - British Standards: 2001. – p. 62 (Adopted International Standard).

21. Fanger P. O. Thermal comfort / Fanger. – New-York: Mc Graw Hill book company, 1970.

22. Wai Leung Tse. A distributed sensor network for measurement of human thermal comfort feelings / Wai Leung Tse, Wai Lok Chan. // Sensors and Actuators. – 2008. –V. 144. – P. 394–402.

23. Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6-31:2006.– [чинний від 01.01.2008]. – К.: - Міністерство Будівництва, Архітектури та Житлово-Комунального Господарства України, 2006. – 73 с. (Державні будівельні норми України).

24. Calculation of Predicted mean Vote (PMV), and Predicted Percentage Dissatisfied (PPD) [Electronic Resource]. –Mode of access: URL: http://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/Termisk_miljoe/PMV-PPD.html. – Title from screen.

25. CBE Thermal Comfort Tool [Electronic Resource]. –Mode of access: URL: <http://comfort.cbe.berkeley.edu>. – Title from screen.

Дешко Валерій Іванович д-р техн. наук, професор кафедри теплотехніки та енергозбереження (ІЕЕ) Національного технічного університету України «КПІ».

Буяк Надія Андріївна аспірант кафедри теплотехніки та енергозбереження (ІЕЕ) Національного технічного університету України «КПІ».

Deshko Valerij Ivanovich d-r science, professor department of Thermal Engineering and Energy Saving National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”.

Buyak Nadia Andriivna postgraduate department of Thermal Engineering and Energy Saving National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”.

Стаття прийнята 20.05.2015р