

Представлена структура ексергетичного балансу тіла людини для зимового та літнього періоду. Отримана залежність споживання ексергії людським тілом від середньої радіаційної температури та температури повітря в кімнаті для зимового періоду. Проаналізовано різні моделі теплового комфорту людини та розроблено комплексну модель на базі енергетичного та ексергетичного підходів для аналізу складної системи джерело тепла – людина – огорожувальні конструкції. За допомогою моделі визначено мінімальне споживання ексергії людським тілом, структура ексергетичного балансу та температурні умови комфортності

Ключові слова: тепловий комфорт, енергоефективність, будівля, ексергія, споживання ексергії людським тілом

Представлена структура ексергетического баланса тела человека для зимнего и летнего периода. Получена зависимость потребления эксергии человеческим телом средней радиационной температуры и температуры воздуха в комнате для зимнего периода. Проанализированы различные модели теплового комфорта человека и разработана комплексная модель на базе энергетического и эксергетического подходов для анализа сложной системы источник тепла – человек – ограждающие конструкции. С помощью модели определены минимальное потребление эксергии человеческим телом, структура эксергетического баланса и температурные условия комфортности

Ключевые слова: тепловой комфорт, энергоэффективность, здание, эксергия, потребление эксергии человеческим телом

МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО КОМФОРТУ ЛЮДИНИ ДЛЯ АНАЛИЗУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУДІВЛІ

В. І. Дешко

Доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри*

E-mail: te@kpi.ua

Н. А. Буяк

Аспірант*

E-mail: korovaj.te@gmail.com

*Кафедра теплотехніки та енергозбереження
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

1. Вступ

Ефективне використання теплової енергії житловими будівлями – одне з найактуальніших питань сьогодення. Забезпечення умов теплового комфорту у приміщенні є не менш важливим в умовах зростання вимог щодо збереження енергії. Досягнення компромісу між цими двома вимогами без шкоди здоров'ю людини – основний виклик до фахівців з енергозбереження.

Математичні моделі теплових відчуттів людини при різних параметрах оточуючого середовища необхідні для проектування систем теплопостачання, а також для регулювання їх роботи. Крім того, забезпечення умов комфорту є обмежувальним фактором при зростаючих вимогах щодо енергозбереження. Існує величезне різноманіття термopsихологічних моделей людини, їх розробка та розвиток розпочалися ще з 1970 року [1]. Основні та широко відомі дві моделі, що передбачають тепловідчуття людини [2, 3]. Модель [2] – це двовузлова енергетична модель людини, що передбачає тепловідчуття за перехідних умов довкілля. Ґрунтуючись на емпіричній моделі [3], розроблено міжнародний стандарт визначення показників теплового комфорту. Дана модель дозволяє врахувати інтенсивність діяльності людини, тип одягу,

швидкість руху повітря, відносну вологість, температуру повітря у кімнаті t_a та середню радіаційну температуру t_r . Модель [4] встановлює залежність між t_a та t_r для зимового періоду, що залежить від інтенсивності діяльності людини. Сучасні дослідники розглядають людину як складну систему, представляючи її у вигляді 18 вузлів [1], створюють нейронну модель для контролю потоку крові до шкіри з метою забезпечити і вдосконалити тепловий комфорт людини. Ексергетичний підхід полягає у визначенні мінімуму споживання ексергії людським тілом і побудованій на енергетичній моделі, тобто дозволяє врахувати фактори, що залежать від оточуючого середовища та від людини. Крім того, така модель визначає мінімум деструкції ексергії у двовузловій системі людини та умови, за яких цей мінімум настає. Врахування комфортних умов у будівлі при енергетичному та ексергетичному аналізі показників енергоефективності будівлі є важливим і не достатньо вивченим фактором.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Основні принципи розгляду будівлі як єдиної енергетичної системи представлено у роботі [5]. Розгляда-

ти проектування енергоефективної будівлі як оптимізацію взаємозалежних збалансованих енергетичних підсистем пропонується і в Україні [6]. Обирати ті чи інші енергозберігаючі заходи вже для існуючих будівель пропонується на основі розроблених алгоритмів. Розроблені підходи для вибору інвестиційного проекту щодо зменшення енергоспоживання будівлями, в основі яких – лінійні моделі [7], підхід, що ґрунтується на застосуванні нелінійної енергетичної функції граничної корисності [8] та теорії нечітких множин [9]. Отже на різних етапах життєвого циклу будівлі дослідники підходять комплексно до вирішення питання енергоефективності, враховуючи джерело тепла та огорожувальні конструкції. Ексергетичний підхід дозволяє якісно оцінити потоки енергії від різних джерел тепла і є новим інструментом для комплексного аналізу. Якісну оцінку енергетичних потоків у складній системі будівлі зроблено у працях [10, 11]. Такий аналіз вказав на ланки системи, де деструкція ексергії – найвища. Поєднання ексергетичного аналізу для будівлі в цілому та ексергетичного аналізу людського тіла [12] дозволить зменшити споживання ексергії системою, та забезпечити мікроклімат у будівлі, що відповідатиме найкращому функціонуванню людини з точки зору другого закону термодинаміки.

При аналізі та проектуванні складних систем джерело тепла – будівля, не достатньо вирішеним є питання включення людини та математичних моделей теплового комфорту при проектуванні та створенні будівель із високою якістю мікроклімату, що забезпечується системами тепlopостачання, вентиляції та кондиціонування. Так модель теплового комфорту людини не враховувалася раніше при розгляді будівлі як складної енергетичної системи [13]. У подальшому автори враховували вплив комфортних умов на інтегровану вартість системи джерело тепла – огорожувальні конструкції [14], однак у якості моделі теплового комфорту обрана модель Богословського, що вказує загалом діапазон умов, має простіший характер і залежить тільки від інтенсивності діяльності людини. Тому при зростаючих вимогах до теплового комфорту будівлі, при комплексному підході до вибору енергозберігаючих заходів та до будівлі в цілому доцільно використовувати моделі теплового комфорту, які враховують інтенсивність діяльності людини, тип одягу, швидкість руху повітря у кімнаті, відносну вологість. Залежно від цілей дослідження вчені представляють різні моделі теплового комфорту, в основі яких лежать енергетичні [15] та ексергетичні баланси [16, 17]. Автори [18] провели нестационарний аналіз ексергетичного балансу людського тіла на основі стаціонарної моделі для літніх умов. Аналіз впливу теплового захисту огорожувальних конструкцій на споживання ексергії людським тілом [17] для різних кліматичних умов показав, що споживання ексергії людським тілом зменшується на 0,6 %, 6,4 %, 10,1 % та 35,9 %, для тепло/волого, помірного, тепло/сухого та холодного типу клімату відповідно, при зростанні теплового захисту. Структура енергетичного та ексергетичного балансу для людського тіла для літнього періоду відображена у роботі [18]. Встановлено, що мінімальне споживання ексергії людським тілом, за умови, що відлік ексергії приймається від температури повітря у кімнаті, відповідає тепловідчуттям людини

«дещо прохолодно» [19]. Таким чином, перспективним є використання комплексного підходу до системи джерело тепла – людина – огорожувальні конструкції з точки зору поєднання забезпечення комфортних умов та енергоефективності будівлі. Використання комплексного підходу потребує застосування відповідної моделі для визначення відповідності рівня забезпечення теплового комфорту та енергетичних показників системи. При цьому в умовах мультिवаріантності енергетичних перетворень активно використовують ексергетичний аналіз.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є розробка комплексної енергетичної та ексергетичної моделі теплового комфорту для аналізу системи джерело тепла – людина – огорожувальні конструкції.

Для досягнення поставленої цілі були сформульовані наступні завдання:

- розробка моделі теплового комфорту з урахуванням особливості її використання, як складової у системі джерело тепла – людина – огорожувальні конструкції;

- за допомогою моделі теплового комфорту визначити залежність споживання ексергії людським тілом від температури повітря у кімнаті при різних значеннях середньої радіаційної температури для зимового періоду, мінімальне значення споживання ексергії та прогнозовану середню оцінку тепловідчуттів людини, що йому відповідає;

- порівняння залежності температури повітря у кімнаті від середньої радіаційної температури для різних моделей теплового комфорту.

4. Моделі теплового комфорту людини

Основна модель оцінки тепловідчуттів людини [3] втілена в європейських стандартах, дозволяє врахувати інтенсивність трудової діяльності людини, тип одягу, відносну вологість повітря. Співвідношення між середньою радіаційною температурою і температурою повітря у кімнаті, що відповідають комфортним умовам у холодний період року, простіше і залежить від інтенсивності діяльності людини, запропоноване В. Н. Богословським [4]. Саме така модель використовувалася авторами при визначенні впливу врахування комфортних умов у будівлі на показники опалення, а також при виборі теплового захисту будівлі та джерела тепла [13].

Ексергетична модель людини вивчалася у наступних роботах [16–21]. В основі ексергетичної моделі лежить дво-вузлова енергетична модель людини [2], що враховує втрати тепла за рахунок дихання, випаровування вологи, а також конвекції та випромінювання. Терморегуляція людського тіла відбувається за рахунок зміни швидкості руху крові, що обумовлено розширенням та звуженням кровоносних судин.

При проектуванні та дослідженні умов функціонування складної системи джерело тепла – людина – огорожувальні конструкції слід використовувати модель, що дозволяє враховувати фактори, що залежать від людини, її одягу, діяльності, оточуючого середовища

та забезпечити необхідний рівень комфорту за допомогою показника прогнозованої середньої оцінки. Для цього в модель системи, таку як наведено в [13], необхідно вбудувати математичну модель людини, оцінка комфортності якої залежить від цих факторів і яка буде пов'язана з енергетичним балансом приміщення через теплонадходження, t_a та t_r .

На основі енергетичної моделі людини [22] та ексергетичного балансу для людського тіла [17] в даній роботі створено математичну модель людини, що дозволяє визначити структуру ексергетичного балансу, споживання ексергії людським тілом, його мінімальне значення, та температуру повітря, що йому відповідає. Значення комфортної температури повітря у кімнаті відповідно до ексергетичного підходу дозволить порівняти його з енергетичним, а також проектувати джерело теплопостачання та визначити енергетичні показники системи таким чином, щоб забезпечувати мінімальний або заданий рівень споживання ексергії людським тілом. Дана модель є стаціонарною і не враховує накопичення енергії та ексергії у ядрі та оболонці людини. Допустимість подібного припущення з точки зору впливу на структуру енергетичного балансу проаналізована в розділі 4. 2.

4. 1. Розробка моделі теплового комфорту людини

Енергетичний баланс людського тіла (за умови, що температура оточуючого середовища стала), враховуючи, що людина складається із ядра та оболонки, представлений наступними співвідношеннями [21]:

$$S_{sk} = K_{min} \cdot (T_{cr} - T_{sk}) + c_{bl} \cdot V_{bl} \cdot (T_{cr} - T_{sk}) - E_{sk} - DRY, \quad (1)$$

$$S_{cr} = (M - E_{res} - W) - K_{min} \cdot (T_{cr} - T_{sk}) - c_{bl} \cdot V_{bl} \cdot (T_{cr} - T_{sk}), \quad (2)$$

де S_{cr} , S_{sk} – накопичення енергії у ядрі та оболонці, Вт/м²; K_{min} – ефективна теплопровідність між ядром та оболонкою = 5,28 Вт/м²·К; T_{cr} – температура ядра, К; T_{sk} – температура оболонки (шкіри), К; c_{bl} – питома теплоємність крові людини = 1,163 Вт·год/л·°С; V_{bl} – потік крові до шкіри кг/с·м².

Величину $DRY=(R+C)$ називають сухим теплообміном із поверхні тіла і визначають наступним чином:

$$DRY = h \cdot F_{cle} \cdot (T_{sk} - T_a), \quad (3)$$

де h – комбінований коефіцієнт теплопередачі, Вт/м²·°С; F_{cle} – коефіцієнт теплової ефективності одягу; T_a – температура повітря у кімнаті, К.

Втрати тепла за рахунок випаровування поділяються на три частини: E_{res} – теплота від випаровування рідини за рахунок дихання; E_{sk} – теплота випаровування із поверхні шкіри; E_{diff} – теплота від випаровування рідини, що проникає крізь шар шкіри; $E_{reg,sw}$ – теплота від випаровування поту, для регулювання температури тіла.

$$E_{sk} = w \cdot E_{max}, \quad (4)$$

$$E_{sk} = (0,06 + 0,094 \cdot w_{regsw}) \cdot E_{max}, \quad (5)$$

$$w_{regsw} = \frac{E_{regsw}}{E_{max}}, \quad (6)$$

$$E_{regsw} = 0,7 \cdot m_{reg,sw} \cdot 2^{\frac{t_{sk}-34,1}{3}}, \quad (7)$$

де E_{max} – максимально можливе випаровування з поверхні шкіри Вт/м²; w – показник вологості шкіри; w_{regsw} – зволоженість шкіри, обумовлена регулярним потінням; 0,7 – прихована теплота поту Вт·год/гр.; $m_{reg,sw}$ – міра покриття шкіри потом, гр/год·м².

$$E_{max} = k \cdot h_c \cdot (p_{sk} - p_a) \cdot F_{pcl}, \quad (8)$$

де k – коефіцієнт Левіса=2,2 °С/мм рт. ст.; p_{sk} – тиск насиченої водяної пари для температури T_{sk} , мм рт. ст.; F_{pcl} – коефіцієнт ефективності проникнення випарів водяної пари з поверхні шкіри через одяг, що залежить від коефіцієнту конвективного теплообміну та від коефіцієнту теплоізоляції одягу людини.

Систему терморегуляції описано наступними рівняннями, а саме температурні сигнали від оболонки та ядра:

$$\sum_{sk} = t_{sk} - 34,1, \quad (9)$$

$$\sum_{cr} = t_{cr} - 36,6, \quad (10)$$

де \sum_{cr} , \sum_{sk} – температурний сигнал від ядра та оболонки відповідно, °С.

На базі цих двох сигналів визначається маса поту та швидкість руху крові по судинах відповідно [21]:

$$m_{reg,sw} = \begin{cases} 0, \text{ якщо } \sum_{cr} < 0 \cup \sum_{sk} < 0, \\ 250 + 100 \cdot \sum_{cr}, \end{cases} \quad (11)$$

$$V_{bl} = \begin{cases} 6,3 + 75 \cdot \frac{\sum_{cr}}{\sum_{sk}}, \text{ якщо } \sum_{cr} > 0 \cap \sum_{sk} < 0, \\ 1 - 0,5 \cdot \frac{\sum_{cr}}{\sum_{sk}}, \\ 6,3 \text{ в інших випадках.} \end{cases} \quad (12)$$

За співвідношеннями (1)–(12) для визначених параметрів оточуючого середовища розраховуються T_{cr} , T_{sk} та E_{sk} . Ці показники дозволяють на основі балансу ексергії визначити споживання ексергії людським тілом.

Ексергетичний баланс для людського тіла [14]:

$$\begin{aligned} & Ex_m + Ex_{gen,cr} + Ex_{gen,sk} + Ex_{inh,air} + \\ & + Ex_{abs,sk-cl} = Ex_{rad,dc} + Ex_{conv} + Ex_{exh,air} + \\ & + Ex_{sw,ha} + Ex_{stored,cr} + Ex_{stored,sk} + Ex_{cons}, \end{aligned} \quad (13)$$

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

На основі емпіричних співвідношень (1)–(13) розроблена математична модель людини в середовищі Mathcad. Дана модель дозволяє визначити мінімальне споживання ексергії людським тілом, температуру

повітря, що йому відповідає, та прогнозовану середню оцінку тепловідчуттів (PMV) людини відповідно до міжнародного стандарту EN ISO 7730. Вхідні параметри моделі дослідження представлені у табл. 1. Вони необхідні для того, щоб порівняти структуру ексергетичного балансу людського тіла для зимових та літніх умов. Для оцінки роботи моделі порівнюємо результати розрахунку складових ексергетичного балансу людського тіла, з результатами [16].

Таблиця 1

Параметри системи дослідження

Параметр	Значення	
	літо	зима
Середовище		
Температура повітря оточуючого середовища T_0 , К	301	273
Відносна вологість оточуючого середовища ϕ_{ov} , %	40	
Відносна вологість повітря в кімнаті ϕ_v , %	40	
Атмосферний тиск, Па	101325	
Людина		
Теплоізоляція одягу, $m^2 \cdot ^\circ C / Wt$	0,124	0,155
Метаболізм, Wt/m^2	58	
Механічна робота, Wt/m^2	0	

4. 2. Результати моделювання

На рис. 1, а представлена частка вхідних потоків ексергії, а на рис. 2, б – для вихідних, наведених в [16] для таких умов: $t_a=t_r=24^\circ C$, $t_0=28^\circ C$, відносна вологість =40 %, активність людини=58 Wt/m^2 , термічний опір одягу =0,124 $m^2 \cdot ^\circ C / Wt$ (що відповідає 0,8 clo), швидкість руху повітря =0,15 м/с. Очевидно, що накопичення ексергії у ядрі та оболонці є незначним – 0,006 та 0,009 % відповідно, тому при розрахунках його не враховуватимемо.

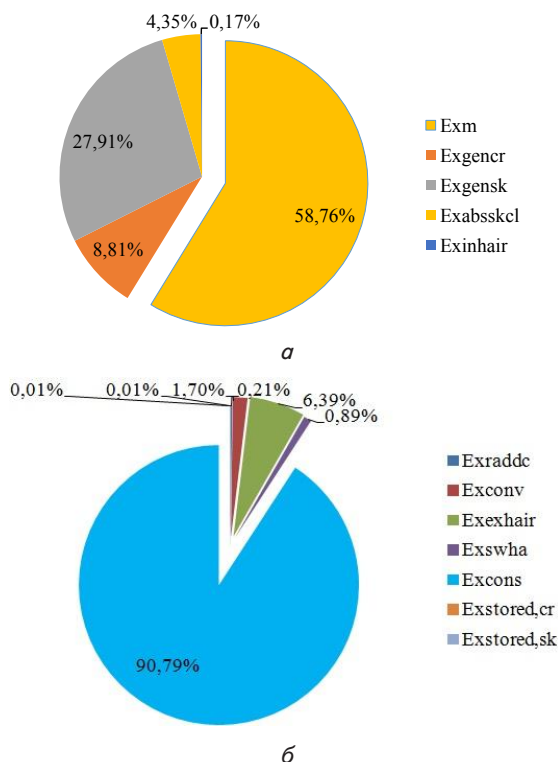


Рис. 1. Структура ексергетичного балансу людського тіла [16]

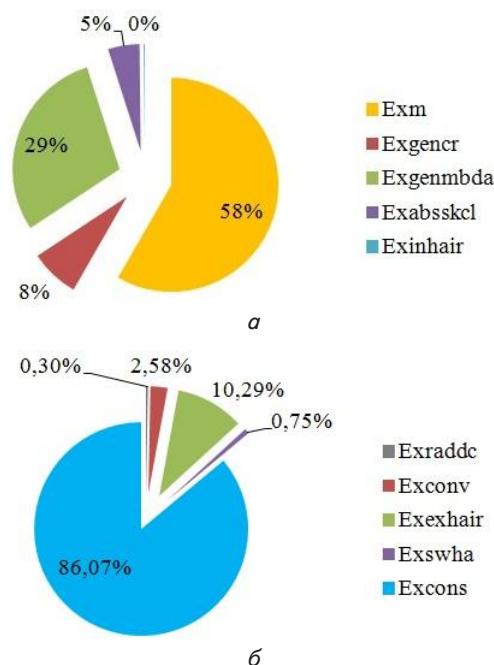


Рис. 2. Структура ексергетичного балансу людського тіла у теплий період року: а – вхідний потік ексергії; б – вихідний потік ексергії

На рис. 2, а, б представлена частка вхідних і вихідних потоків ексергії для розробленої стаціонарної моделі людини без врахування накопичення ексергії та енергії у ядрі та оболонці для умов аналогічних [16]. Баланс вхідних потоків отриманий за допомогою розробленої моделі, аналогічний прикладу, представленому автором в [16], рис. 1. Баланс вихідних потоків ексергії відмінний, наприклад споживання ексергії людським тілом та ексергія повітря, що видихається, відрізняються на 4 % порівняно з моделлю [16]. Похибка результатів становить в середньому 4 %. Отже дану модель доцільно використовувати у подальшому дослідженні.

На рис. 3 зображений баланс ексергії людського тіла для зимового періоду. Відповідні параметри моделі дослідження представлені у табл. 1: $t_a=t_r=20^\circ C$, $t_0=0^\circ C$, відносна вологість =40 %, активність людини =58 Wt/m^2 , термічний опір одягу =0,155 $m^2 \cdot ^\circ C / Wt$ (що відповідає 1 clo), швидкість руху повітря =0,15 м/с. Структура вихідних потоків ексергії змінюється при зміні умов оточуючого середовища та параметрів мікроклімату у кімнаті. Якщо для літніх умов основна частка вихідного потоку ексергії припадала на споживання людським тілом – 86 %, то для зимових умов – на ексергію випромінювання – 53 %, а на споживання ексергії людським тілом – лише 16 %. Це пояснюється більшою різницею між температурою поверхні шкіри та оточуючого середовища. Температура повітря у приміщенні приймалася рівною 24 та 20 $^\circ C$ для літніх і зимових умов відповідно, зростання абсолютної величини конвективного та радіаційного теплообміну у балансі обумовлює зменшення частки споживання ексергії людським тілом.

На рис. 4, 5 представлена залежність споживання ексергії від середньої радіаційної температури та температури повітря у кімнаті для параметрів системи, що представлені у табл. 1. Споживання ексергії людським

тілом змінюється залежно від параметрів мікроклімату у кімнаті, від параметрів людини. На рис. 4 представлено зміну споживання ексергії людським тілом залежно від температури повітря у кімнаті. Різні криві відповідають різним значенням середньої радіаційної температури приміщення, інші параметри – незмінні. При низькій 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.

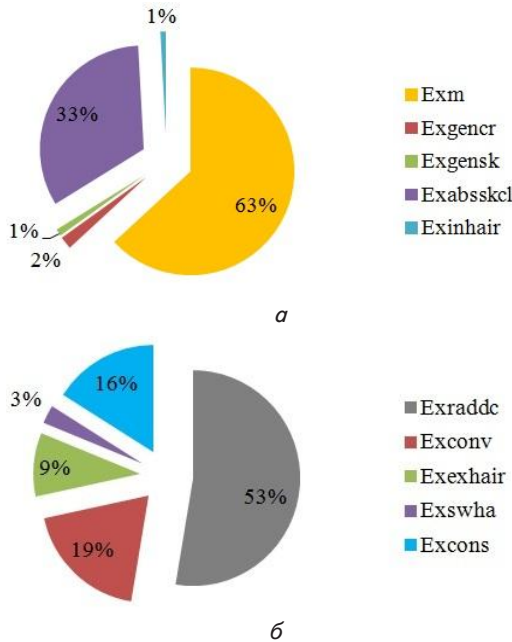


Рис. 3. Структура ексергетичного балансу людського тіла у холодний період року: а – вхідний потік ексергії; б – вихідний потік ексергії

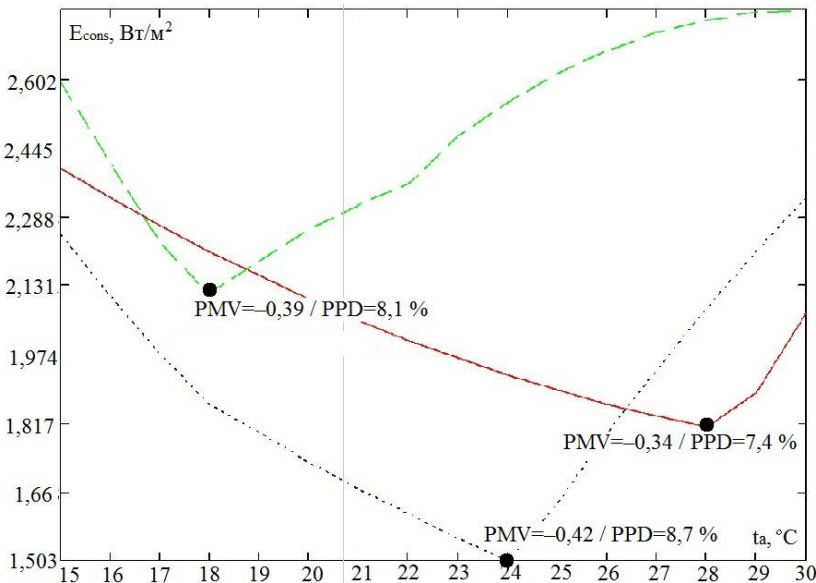


Рис. 4. Графік залежності споживання ексергії людським тілом E_{cons} від температури повітря у кімнаті t_a , для різних значень середньої радіаційної температури t_r : — для $t_r=15$ °С; — для $t_r=20$ °С; — — — для $t_r=28$ °С; ● — мінімум споживання ексергії

На графіку 4 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 $-0,34 - -0,42$. В [16] мінімум споживання ексергії відповідає значенню $PMV=-0,611$ (однак там температура оточуючого середовища приймалася рівною температурі повітря у кімнаті).

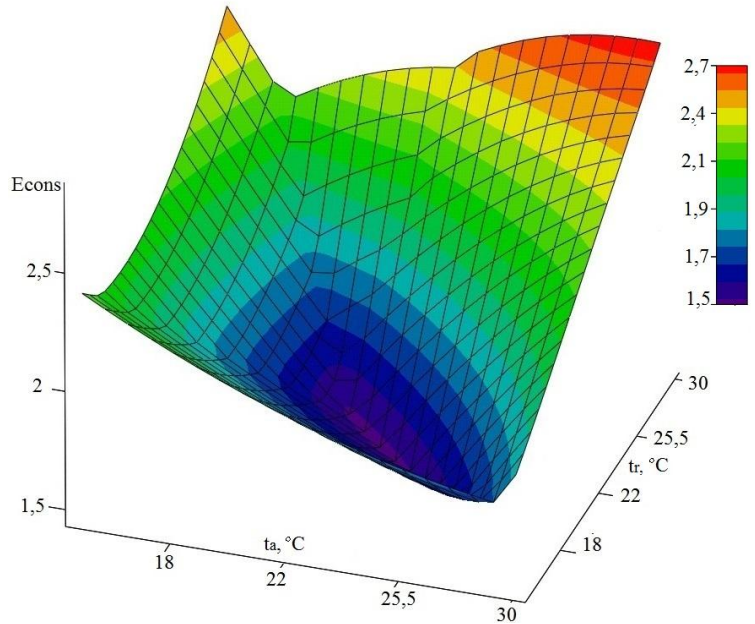


Рис. 5. Поверхня споживання ексергії людським тілом E_{cons} залежно від температури повітря в кімнаті t_a та середньої радіаційної температури t_r

На рис. 5 представлена поверхня, що відображає залежність споживання ексергії людським тілом від t_a та t_r в діапазоні змін t_a від 15 до 30 °С, t_r від 15 до 30 °С.

Проведені порівняння залежності $t_a(t_r)$ для різних моделей теплового комфорту представлені на рис. 6.

Відмінність між температурою внутрішнього повітря, яка потрібна для забезпечення комфортних умов при ексергетичному підході та при $PMV=0$, лежить у діапазоні $0,8-1,4$ °С при різних значеннях t_r . З метою порівняння результатів для різних моделей теплового комфорту визначено середньоквадратичне відхилення комфортної температури повітря у кімнаті у порівнянні із комфортною температурою, за якої прогнозовані тепловідчуття людини відповідатимуть індексу $PMV=0$ (теповідчуття – комфортно). Енергетична модель людського тіла, для якої $PMV=0$, обрана базовою, оскільки є найпоширенішою і лежить в основі міжнародного стандарту EN ISO 7730.

Найвище значення середньоквадратичного відхилення комфортної температури повітря характерне для моделі з $PMV=1$ та -1 і становить $7,3\text{ }^\circ\text{C}$ та $7,2\text{ }^\circ\text{C}$ відповідно. Середньоквадратичне відхилення для моделі Богословського дорівнює $5,1\text{ }^\circ\text{C}$ та $5,7\text{ }^\circ\text{C}$, для моделі із $PMV=-0,5$ та $0,5-3,7\text{ }^\circ\text{C}$ та $3,8\text{ }^\circ\text{C}$ відповідно. Найнижче значення середньоквадратичного відхилення відповідає ексергетичній моделі теплового комфорту і рівне $1,4\text{ }^\circ\text{C}$.

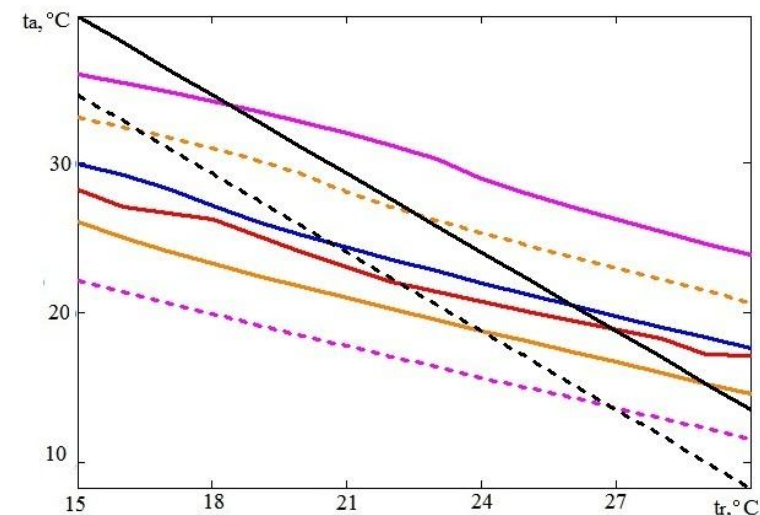


Рис. 6. Залежність середньої радіаційної температури t_r повітря від температури повітря у кімнаті t_a для різних моделей теплового комфорту:
 — мінімум споживання ексергії; — $PMV=0$;
 — $PMV=0,5$; — $PMV=-0,5$; — $PMV=1$; — $PMV=-1$;
 — , — — — — діапазон комфортних умов за Богословським [15]

5. Обговорення результатів та порівняння різних моделей теплового комфорту

У літній період конвективний та радіаційний теплообмін з поверхні людського тіла є незначним порівняно з іншими складовими, що пов'язано з малою різницею між температурою поверхні шкіри та повітря в кімнаті. У зв'язку з цим частка споживання ексергії людським тілом у загальному балансі зростає порівняно із зимовими умовами.

З наукової точки зору показник мінімуму споживання ексергії є більш прийнятним, ніж показник прогнозованої середньої оцінки тепловідчуттів людини, розрахований відповідно до EN ISO 7730. Дослідження показали, що мінімум споживання ексергії при температурі оточуючого середовища $0\text{ }^\circ\text{C}$, яка відповідає зимовим умовам (інші дослідники проводили моделювання, виходячи з припущення, що температура повітря у кімнаті дорівнює температурі зовнішнього середовища), відповідає значенню $PMV=-0,34$ до $-0,42$ (це відчуття легкої прохолоди). Для умов: $t_o=t_a=20\text{ }^\circ\text{C}$, для мінімуму споживання ексергії – $PMV=-0,611$ [17].

Умови дослідження для порівняння різних моделей комфорту відповідають параметрам, наведеним у табл. 1 (зима). Модель Богословського – найпростіша і представлена відповідним діапазоном $t_a(t_r)$, її рекомендовано використовувати при застосуванні систем опалення, що значно підвищують радіаційну температуру приміщення. Із рис. 6 можна зробити висновки, що при середній радіаційній температурі приміщення $=27\text{ }^\circ\text{C}$ верхня межа діапазону комфортної температури відповідає

PMV , близькому до нейтральних умов, а нижня межа $PMV=-1$ (тепловідчуття «холодно»). Якщо середню радіаційну температуру прийняти $=18\text{ }^\circ\text{C}$, то верхня межа комфортної температури відповідає $PMV=1$, а нижня – близька до комфортних умов. Отже при високій середній радіаційній температурі у моделі Богословського доцільно обирати найвище значення із температурного діапазону, а при низькій – найнижче. Однак при залученні сучасних засобів комп'ютерної техніки при проектуванні та дослідженні складної системи джерело тепла – людина – огорожувальні конструкції слід використовувати модель Фангера. Це пояснюється тим, що така модель дозволяє враховувати фактори, що залежать від людини, оточуючого середовища та забезпечити необхідний рівень комфорту за допомогою показника прогнозованої середньої оцінки.

Відмінність між розробленою моделлю та моделлю [3] 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 деструкції 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 можна допустити, що забезпечення комфортних умов відповідно до ексергетичного підходу дозволяє знизити температуру повітря у кімнаті, в середньому на $1,4\text{ }^\circ\text{C}$, а отже – зеконотити споживання енергоресурсів.

6. Висновки

1. Розроблено стаціонарну модель теплового комфорту людини з урахуванням особливості її використання, як складової у системі джерело тепла – людина – огорожувальні конструкції, на основі енергетичного та ексергетичного підходу. В даній моделі враховані сигнали від оболонки та ядра, відлік ексергії проводиться від температури оточуючого середовища, що забезпечує коректне інтегрування ексергетичних потоків людини при розгляді системи в цілому.

2. На основі розробленої моделі 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 K . Встановлено, що прогнозована середня оцінка тепловідчуттів людини для таких умов при мінімальному споживанні ексергії людським тілом знаходиться в діапазоні $-0,34 - -0,42$.

3. Представлено порівняння залежності комфортної температури повітря від середньої радіаційної температури для різних моделей теплового комфорту. Дані параметри є важливими при комплексному аналізі та проектуванні системи джерело тепла – людина – огорожувальні конструкції. Комфортна температура

внутрішнього повітря є вихідною величиною для проектування та експлуатації джерела теплоти. А середня радіаційна температура дозволяє врахувати вплив огорожувальних конструкцій. Визначено середньоквадратичне відхилення S комфортної температури повітря у приміщенні при різних значеннях середньої радіаційної температури у порівнянні з моделлю, де $PMV=0$. Для моделі Богословського $S=5,1$ °C та $5,7$ °C, така модель дозволяє врахувати інтенсивність діяль-

ності людини, тому її доцільно враховувати тоді, коли цей фактор – найважливіший. Для розробленої моделі S – найнижче і дорівнює $1,4$ °C, тому використання даного підходу дозволяє знизити температуру повітря у кімнаті на $1,4$ °C. Застосування розробленої моделі для створення комфортних умов у будівлі є науково обґрунтованим на основі другого закону термодинаміки і дозволяє зменшити енергоспоживання за рахунок зниження температури повітря в кімнаті.

Література

1. Лукин, Е. С. Современная оксидная керамика и области ее применения [Текст] / Е. С. Лукин, Н. А. Макаров, А. И. Козлов // Конструкции из композиционных материалов. – 2007. – № 1. – С. 3–13.
2. Костиков, В. И. Сверхвысокотемпературные композиционные материалы [Текст] / В. И. Костиков, А. Н. Варенков. – М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 560 с.
3. Mukherjee, D. The influence of TiO_2 content on the properties of glass ceramics: Crystallization, microstructure and hardness [Text] / D. Mukherjee, S. Das // *Ceramics International*. – 2014. – Vol. 40, Issue 3. – P. 4127–4134. doi: 10.1016/j.ceramint.2013.08.067
4. Левицкий, И. А. Особенности структуро- и фазообразования в цирконийсодержащих фриттах и глазурах [Текст] / И. А. Левицкий, С. Е. Баранцева, Н. В. Мазура // *Стекло и керамика*. – 2009. – № 7. – С. 25–28. doi: 10.1007/s10717-009-9178-7
5. Шиманская, А. Н. Особенности формирования титансодержащих глазурных покрытий плиток для полов [Текст] / А. Н. Шиманская, И. А. Левицкий // *Стекло и керамика*. – 2016. – № 3. – С. 24–30. doi: 10.1007/s10717-009-9178-7
6. Chiodini, N. Nanostructured $SnO_2 - SiO_2$ glassceramic: a competitor for Si nanodots in silica [Text] / N. Chiodini, A. Paleari, M. Romagnoli // *Nanophotonic Materials and Systems II*. – 2005. – Vol. 5925. – P. 77–86. doi: 10.1117/12.616537
7. Paleari, A. Nanostructured $SnO_2 - SiO_2$ glassceramic thin films as electroluminescent material: an impedance spectroscopy analysis [Text] / A. Paleari, N. Chiodini, M. Romagnoli // *Nanophotonic Materials IV*. – 2007. – Vol. 6639. doi: 10.1117/12.732449
8. Бобкова, Н. М. Кристаллизация стекол системы $K_2O - Li_2O - Al_2O_3 - SiO_2$ модифицированных SnO_2 [Текст] / Н. М. Бобкова, Н. М. Кузьменкова // *Стекло и керамика*. – 2008. – № 11. – С. 11–13. doi: 10.1007/s10717-009-9096-8
9. Бобкова, Н. М. Кристаллизация лейцита из стеклообразующих расплавов системы $K_2O - Al_2O_3 - SiO_2$ [Текст] / Н. М. Бобкова, Н. М. Кузьменкова, И. А. Богданович // *Стекло и керамика*. – 2008. – № 6. – С. 32–34.
10. Саввова, О. В. Структурные изменения в стеклах системы $R_2O - RO - TiO_2 - P_2O_5 - R_2O_3 - SiO_2$ при их микроликвации [Текст] / О. В. Саввова, Л. Л. Брагина, Е. В. Бабич // *Стекло и керамика*. – 2010. – № 12. – С. 7–10.
11. Брагина, Л. Л. Технология эмали и защитных покрытий [Текст]: учеб. пособие / Л. Л. Брагина, А. П. Зубехин, Я. И. Белый и др. – Харьков: НТУ «ХПИ»; Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2003. – 484 с.
12. Powder Diffraction File. Inorganic Phases. Alphabetical Index (chemical & mineral names) [Text]. – Pennsylvania (USA): JCDPDS (Intern. Centr. Diffr. Data), 1985. – 1856 p.
13. Лисачук, Г. В. Программа расчета вязкости, поверхностного натяжения и ТКЛР для многокомпонентных стекол [Текст] / Г. В. Лисачук, О. А. Романова, Р. В. Романов, Ю. Д. Трусова // *Вісник НТУ «ХПИ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Хімія, хімічна технологія та екологія»*. – 2008. – № 33. – С. 137–142.
14. Li, D. Synthesis and intercalation properties of nanoscale layered tetratitanate [Text] / D. Li, J. Yang, L. L. Zhang, X. Wang // *Journal of Materials Chemistry*. – 2002. – Vol. 12, Issue 6. – P. 1796–1799. doi: 10.1039/b109759h
15. Левицкий, И. А. Нефритованные легкоплавкие прозрачные глазури [Текст] / И. А. Левицкий, Г. Я. Миненкова // *Стекло и керамика*. – 1998. – № 8. – С. 34–37.