

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Буяк Надія Андріївна



УДК 620.98: 658.24

**ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ БУДІВЛІ В
УМОВАХ ТЕПЛОВОГО КОМФОРТУ**

Спеціальність 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі теплотехніки та енергозбереження Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Дешко Валерій Іванович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри теплотехніки та енергозбереження

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Новосельцев Олександр Вікторович,
Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, провідний науковий співробітник,
член-кореспондент Національної академії наук України

доктор технічних наук, професор
Василенко Сергій Михайлович,
Національний університет харчових технологій
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри теплоенергетики та холодильної техніки

Захист дисертації відбудеться «27» грудня 2017 р. о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.20 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою:

03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корп. 22, ауд. 316.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою:

03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «27» листопада 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
канд. техн. наук, доцент



А.М. Ковальчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Близько 40 % світового енергоспоживання та 1/3 викидів парникових газів припадає на будівлі. Саме тому зростають вимоги щодо ефективного використання енергії будівлями у рамках адаптації українських стандартів до міжнародних. Крім того, слід враховувати обмеження, обумовлені вимогами щодо якості мікроклімату, які регламентуються сучасними стандартами та показниками. У цьому випадку актуальним є досягнення компромісу між зниженням енергоспоживання будівель та забезпеченням належного рівня теплового комфорту. Ефективність споживання енергії в будівлі залежить не тільки від конструкції будівлі й інженерних систем, джерел енергії, погоднокліматичних умов, але і від того, які вимоги до умов комфортності пред'являє людина. Додаткове підвищення енергоефективності будівель при термомодернізації можливе, якщо знизити температуру повітря у приміщенні за рахунок зростання середньої радіаційної температури. Аналіз цих факторів у комплексі їх взаємного впливу потребує подальшого вивчення і є актуальним. Таким чином, **наукова задача** дисертаційної роботи полягає у розробці та розвитку методів оцінки ефективності енергосистеми будівлі в умовах теплового комфорту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконані в роботі дослідження відповідають напрямку «Енергетика та енергоефективність», законам України «Про енергозбереження», «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки», «Про енергетичну ефективність будівель», направленості тематики науково-дослідної роботи (НДР) кафедри теплотехніки та енергозбереження Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Матеріали дисертаційної роботи використано під час виконання держбюджетних НДР: «Розробка комплексу науково-технічних рішень для створення системи енергоменеджменту закладів освіти МОН України» (№ держреєстрації 0115U000313); «Управління енергоспоживанням об'єктів комунальної енергетики» (№ держреєстрації 0117U000469).

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності енергетичної системи будівлі шляхом урахування взаємозв'язку джерел енергії, теплового захисту, показників теплового комфорту і параметрів мікроклімату приміщень. Реалізацію окресленої мети можна вирішити так:

- провести аналіз розроблених підходів до підвищення ефективності енергетичної системи будівлі в умовах теплового комфорту;
- визначити особливості та можливості енергетичного, ексергетичного та ексергоекономічного аналізу під час розгляду будівлі в комплексі з джерелом теплоти та із врахуванням обмежень щодо теплового комфорту людини;
- розробити комп'ютерну модель визначення умов теплового комфорту людини для комплексного аналізу складної системи «джерело теплоти – людина – огорожувальні конструкції» (ДЛК);
- обґрунтувати вибір функції для комплексного аналізу та вибору джерела теплоти та огорожувальних конструкцій;

- створити модель для аналізу показників енергоефективності системи та представити блок-схему інтегрування показників та параметрів теплового комфорту людини у складну систему «джерело теплоти – огорожувальні конструкції будівлі» (ДК).

Об'єкт дослідження – процеси перетворення енергії та ексергії у складній системі ДЛК.

Предмет дослідження – методи і показники оцінювання енергетичної та ексергетичної ефективності системи ДЛК.

Методи дослідження. Науково-методичну основу дослідження склали такі загальнонаукові та спеціальні методи: аналізу та синтезу, математичного моделювання, прогнозування, математичної статистики, прикладної термодинаміки.

Наукова новизна одержаних результатів – розвинуто підходи щодо аналізу енергетичної системи ДЛК для зменшення споживання енергії та ексергії будівлею за умови урахування показників комфортності:

- вперше запропоновано та обґрунтовано врахування зміни умов комфортності при термомодернізації будівель шляхом застосування моделі теплового комфорту та розрахунку середньої радіаційної температури приміщення, що дає змогу знизити температуру повітря у приміщенні, а відповідно і знизити енергоспоживання;

- створено математичну модель для аналізу показників енергоефективності системи ДЛК, яка у порівнянні з відомими дає змогу враховувати вплив стандартних параметрів теплового комфорту на споживання енергії по ланцюгу до первинного палива;

- створено регресійну модель для розрахунку температури повітря у кімнаті і на її основі визначено впливовість внутрішніх та зовнішніх факторів, що в кінцевому підсумку зробить можливим регулювання роботи систем тепlopостачання відповідно до умов комфортності;

- розвинуто метод визначення інтегральної експлуатаційної вартості та показників енергоефективності системи ДЛК, побудований на базі енергетичної та ексергоекеномічної моделей, які на відміну від існуючих є динамічними (тобто дають змогу враховувати зміну вартості грошей та енергоносіїв в часі), що дозволяє враховувати вартісні та теплотехнічні характеристики джерела теплоти та огорожень будівлі.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що запропоновані підходи за рахунок використання моделі теплового комфорту, дозволять визначити потреби на опалення при різних умовах комфортності, знизити енергоспоживання будівлі без шкоди здоров'ю людини, а також оцінити можливість підвищення енергоефективності при термомодернізації за рахунок зміни умов комфортності, параметрів теплового захисту та мікроклімату приміщень. Описані методи вибору теплового захисту огорожувальних конструкцій будівлі у комплексі з джерелом теплоти дають змогу системно підходити до економічного обґрунтування проектних рішень. Запропонований ексергетичний підхід до будівлі в цілому дає змогу аналізувати використання якості енергії як при проектуванні, так і при експлуатації. Результати передано до використання

в ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» для розробки норм щодо ефективного використання енергії в будівлях, у Центр ресурсоефективного та чистого виробництва для техніко-економічного обґрунтування вибору джерела теплоти, а також у навчальному процесі КПІ імені Ігоря Сікорського на кафедрі теплотехніки та енергозбереження. Отримано акти впровадження результатів роботи та свідоцтва авторського права на методики.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є завершеною науковою працею. Всі наукові положення і результати, наведені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто. У друкованих працях, які були опубліковані у спів-авторстві, здобувачеві належать такі результати: проведено аналіз підходів щодо комплексного вибору джерела теплоти та огорожувальних конструкцій [1, 11]; проаналізовано різні моделі теплового комфорту людини [2]; розроблено методичні підходи до комплексного вибору джерела теплоти огорожувальних конструкцій на основі функції інтегральної вартості системи [1, 5, 8, 10, 11–13, 16, 19, 22]; запропоновано враховувати комфортні умови у розрахунку інтегральної вартості системи ДК [5 – 8, 10, 15, 17]; запропоновано використання енергетичних, ексергетичних показників для оцінки енергоефективності системи ДК, проаналізовано потоки енергії від джерела теплоти до огорожувальних конструкцій у будівлі [9, 21]; розроблено ексергетичну модель людини для зимового періоду [2]; на базі чисельного експерименту створено регресійну модель для визначення комфортної температури відповідно до енергетичного та ексергетичного підходів [3, 14]; змодельовано вплив різних факторів на потребу на опалення під час застосування енергетичної та ексергетичної концепції щодо забезпечення комфортних умов [3]; запропоновано методику застосування ексергоекономічних показників для вибору джерела теплоти, що враховує зміну вартості енергоносіїв у часі [4].

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, представлені в дисертації, було висвітлено на міжнародних науково-технічних конференціях: «Проблеми енергозабезпечення в АПК України» (Харків, 2009), «Екологія. Економіка. Енергозбереження» (Суми, 2009), «Проблеми промислової теплотехніки» (Київ, 2009, 2015, 2017); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми і перспективи розвитку академічної та університетської науки» (Полтава, 2015); науково-технічній конференції Інституту енергозбереження та енергоменеджменту «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ, 2009, 2016, 2017); VIII та IX Всеукраїнському конкурсі «Молодь – енергетиці України – 2009, 2010 Відкритий конкурс молодих енергетиків»; на аспірантських читаннях пам'яті А. В. Праховника (Київ, 2017).

Публікації. За результатами дослідження опубліковано 22 наукові праці, у тому числі одна колективна монографія, 10 статей у наукових фахових виданнях (з них дві статті у виданнях іноземних держав, чотири у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), два свідоцтва про реєстрацію авторського права на науковий твір, дев'ять тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 169 найменувань

та шести додатків. Загальний обсяг дисертації складає 214 сторінок, 69 рисунків, 31 таблиця.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету, наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, а також наведено відомості про їх апробацію, впровадження та публікації.

У **першому** розділі проведено аналіз розроблених підходів до підвищення енергоефективності будівлі, як енергетичної системи, в умовах теплового комфорту. Методи оцінки та підвищення енергоефективності будівель стали об'єктом дослідження Табунщикова Ю.А., Бродача М.М., Мхитаряна Н.М., Драганова Б.Х, Дешка В.І, Фаренюка Г.Г, Фіалко Н.М, Маляренка В.А, Гершковича В.Г та ін. На основі аналізу життєвого циклу будівлі встановлено, що найвища частка витрат енергії припадає на період експлуатації і коливається в межах 41–91 %. Тому проекти щодо підвищення енергоефективності будівель спрямовані на зменшення цієї складової частини. Умотивовано необхідність комплексного підходу до аналізу будівлі на етапі проектування, експлуатації та вибору енергозберігаючих заходів. Проаналізовано різні праці, де рекомендовано вибирати енергозберігаючі заходи на основі лінійних моделей та функції граничної корисності. Встановлено, що за умови комплексного підходу до вибору енергозберігаючих заходів до будівлі в цілому доцільно використовувати моделі теплового комфорту, які враховують суб'єктивні та об'єктивні фактори. Встановлено, що ексергетичний підхід широко застосовують для аналізу потоків енергії від джерела теплоти до огорожувальних конструкцій у роботах А. Нерпсали, М.Т. Balta, М. Shukuya, D. Schmidt, I. Dincer, G. Tsatsaronis, А. Вежан, С. Yücer. Використання комплексного підходу передбачає застосування відповідної моделі для визначення рівня забезпечення теплового комфорту та енергетичних показників системи. Водночас в умовах мультиваріантності енергетичних перетворень активно використовують ексергетичний аналіз. Проведено комплексний аналіз моделей теплового комфорту. Умотивовано доречність ексергетичного аналізу людського тіла. Описано сучасні моделі, які поділяють людину на велику кількість вузлів і враховують зміну параметрів навколишнього середовища. Обґрунтовано взаємозв'язок між споживанням ексергії людським тілом та показником *PMV* (прогнозована середня оцінка теловідчуттів людини), отже, існує перспектива використання ексергетичної моделі людини під час проектування будівлі з високою якістю мікроклімату, однак можливості її використання потребують додаткового аналізу. Оскільки середня радіаційна температура має вагомий вплив на відчуття теплового комфорту людиною, тому проаналізовано різні методи розрахунку середньої радіаційної температури, доведено необхідність враховувати випромінювання від низькотемпературних огорожень, опалювального приладу та сонця. На підставі проведеного аналізу обґрунтовано доречність комплексного підходу до складної системи ДЛК. Водночас необхідно враховувати особливості вибору моделі теплового комфорту людини та розрахунку середньої радіаційної температури приміщення. На основі проведеного огляду літератури з обраної теми зроблено висновки про необхідність поглибленого дослідження складної системи ДЛК, що

полягає у застосуванні методів енергетичного, ексергетичного, економічного та ексергоекономічного аналізів, розробці й використанні енергетичної та ексергетичної моделей людини під час проектування та експлуатації будівель. А також показано суттєвий вплив середньої радіаційної температури на тепловідчуття людини, що обумовлює необхідність врахування цього фактору при термомодернізації будівлі, що дає змогу знизити температуру повітря у приміщенні і додатково енергоспоживання усєї системи.

У **другому** розділі описані методики обґрунтування термомодернізації будівлі в комплексі з вибором джерела теплоти із врахуванням тенденцій щодо зміни вартості грошей та енергоносіїв в часі, визначення показників енерго- та ексергоефективності системи, врахування моделі людини при оцінці енергоспоживання будівлі. Обґрунтовано доцільність застосування функції інтегральної вартості для комплексного вибору джерела теплоти та огороджувальних конструкцій будівлі:

$$B = \sum_{\tau=1}^n \frac{B_{\tau}^{\text{обслг}}}{(1+E)^{\tau}} + \sum_{\tau=0}^n \frac{B_{\tau}^{\text{енерг}}(1+l \cdot \tau)}{(1+E)^{\tau}} + I_0 + I_{\text{із}} + I_{\text{со}}, \quad (1)$$

де $B_{\tau}^{\text{енерг}}$ – річні затрати за спожиті енергоносії, євро; $B_{\tau}^{\text{обслг}}$ – інші затрати, євро; I_0 – капітальні затрати на придбання теплогенеруючого обладнання, євро; $I_{\text{із}}$ – витрати, спрямовані на покращення теплового захисту будівлі, євро; $I_{\text{со}}$ – витрати на придбання приладів опалення, євро; l – коефіцієнт, що враховує приріст цін на енергоносії євро/рік; n – час, для якого визначаються інтегральні дисконтовані витрати, роки; E – ставка дисконтування.

Капітальні затрати на придбання теплогенеруючого обладнання:

$$I_0 = i_0 \cdot P, \quad (2)$$

де P – необхідна встановлена потужність джерела теплоти, кВт; i_0 – значення одиниці встановленої потужності джерела теплоти, євро/кВт.

Нехай витрати на встановлення та купівлю теплоізоляційних матеріалів, вікон і дверей мають лінійну залежність від термічного опору, що визначається:

$$I_{\text{із}} = \sum_i (A_i + B_i \cdot F_i) \cdot \lambda \cdot R_{\text{із}} + \sum_j (A_j + B_j \cdot F_j) \cdot R_j, \quad (3)$$

де $R_{\text{із}}$ – термічний опір додаткового шару теплоізоляції, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$; R_j – термічний опір тих огороджувальних конструкцій, підвищення якого можливе шляхом заміни конструкції, наприклад вікна та двері; A_i, A_j – коефіцієнти, що визначають вартість встановлення ізоляції, вікон чи дверей, приведену до одиниці товщини та опору відповідно євро/м, $(\text{євро} \cdot \text{Вт})/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; B_i – коефіцієнт, що враховує вартість ізоляційного матеріалу, приведену до його опору теплопередачі, євро/м³; B_j – коефіцієнт, що враховує вартість дверей чи вікон, приведену до їх опору теплопередачі, $(\text{євро} \cdot \text{Вт})/(\text{м}^4 \cdot \text{К})$; λ – теплопровідність теплоізоляційного матеріалу, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; i – огороджувальні конструкції, термічний опір яких можна збільшувати шляхом встановлення додаткового шару теп-

лоізоляції; j – огорожувальні конструкції, термічний опір яких можна змінити шляхом їх заміни.

Для оцінки впливу різних приладів опалення на комфортні умови в приміщенні з різними джерелами теплоти та зміну функції інтегральних витрат на опалення будівлі при врахуванні витрат на прилади опалення та особливостей комфортних умов, що ними забезпечуються, витрати на систему опалення визначаються так:

$$I_{co} = \sum_{r=1}^p i_{co} \cdot \frac{P^2}{k \cdot \Delta T}, \quad (4)$$

де p – кількість приладів опалення, шт.; i_{co} – питома вартість опалювального приладу, €/ро/(м²·Вт); P – необхідна потужність приладу опалення, Вт; ΔT – температурний напір, К; k – коефіцієнт теплопередачі приладу Вт/(м²·К).

Функція (1) дозволяє врахувати зміну вартості енергоносіїв в часі за допомогою коефіцієнта l , дисконтування за допомогою ставки дисконтування E , зміну капітальних затрат на джерело теплоти при зростанні теплового захисту, енергоефективність джерела теплоти.

Модель для аналізу потоків енергії та ексергії для системи із різними джерелами теплоти представлена на рис. 1.

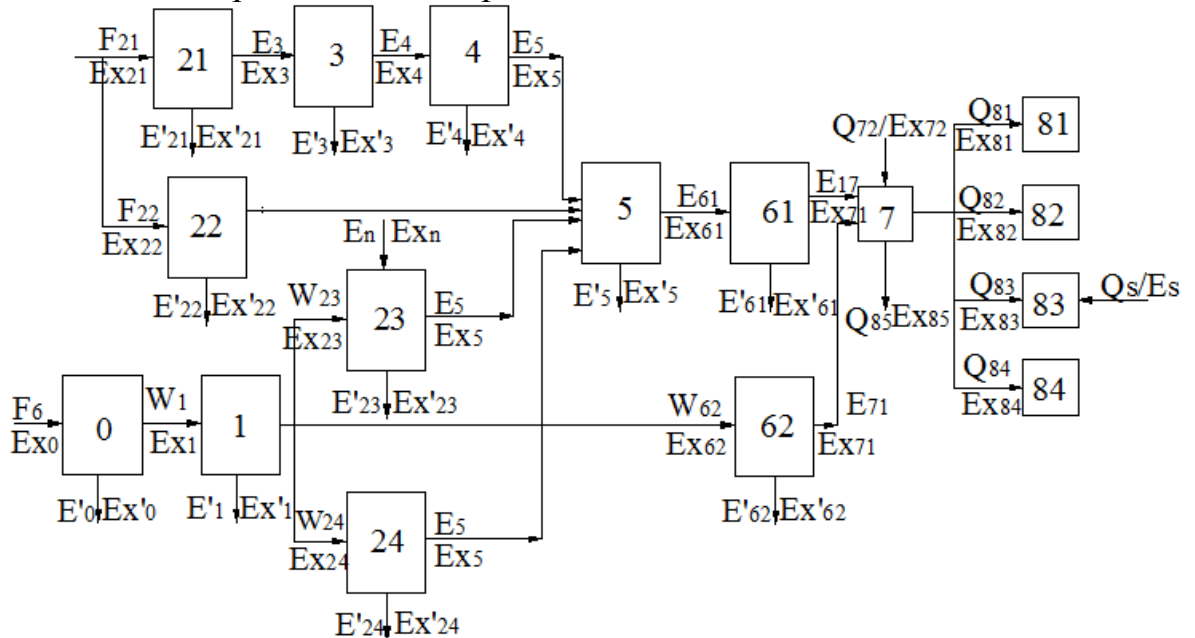


Рис.1 – Схема потоків енергії / ексергії для різних джерел теплоти будівлі: 0 – електрична станція; 1 – електромережі; 21 – газовий котел централізованого теплопостачання; 22 – газовий котел автономної котельні; 23 – ТНУ (теплова насосна установка); 24 – електричний котел; 3 – теплова мережа; 4 – тепловий пункт; 5 – система опалення; 61 – прилад опалення; 62 – кабелі в огороженнях; 7 – повітря в кімнаті; 81 – зовнішня стіна; 82 – покриття; 83 – вікно; 84 – двері; E – підведена/відведена енергія; Ex – підведена/відведена ексергія; W – електрична енергія; E' – втрати енергії; Ex' – втрати ексергії

Поряд з питомими витратами теплоти на опалення в якості показника енергоефективності доцільно використовувати коефіцієнт ефективності використання первинного палива. А для оцінки ефективності використання ексергії первинного палива можна використовувати ексергетичний показник

$$\eta_e = \frac{Ex_{81} + Ex_{82} + Ex_{83} + Ex_{84} + Ex_{85}}{Ex_F}, \quad (5)$$

де Ex_F – ексергія первинного палива (для різних джерел теплоти це може бути Ex_{21} , Ex_{22} або Ex_0), кВт·год.

Визначення рівня теплового комфорту в будівлі при зміні вимог від людини чи при проведенні термомодернізації можливе емпіричним шляхом чи за рахунок моделювання. Існуючі стандарти щодо мікроклімату у приміщенні та показники теплового комфорту ґрунтуються на енергетичній моделі, що розроблена Фангером, в основі якої лежить енергетичний баланс, який використовується для визначення розсіювання теплоти людським тілом. Механізми терморегуляції в цьому випадку не враховуються. У той час ексергетична модель теплового комфорту дає змогу враховувати процеси термогенезу та термолізу, оскільки побудована на базі енергетичної моделі Гага, що описує механізм терморегуляції людини. Саме тому для оцінки впливу суб'єктивних та об'єктивних параметрів теплового комфорту на споживання первинного палива обрано ексергетичну модель теплового комфорту, доповнену можливістю врахування сонячного та власного теплового потоку випромінювання від огорожень, шляхом розрахунку середньої радіаційної температури. Людське тіло розглядається як відкрита термодинамічна система за сталих умов, враховано втрати теплоти за рахунок дихання, випаровування вологи, а також втрати теплоти за рахунок конвекції та випромінювання. Енергетичний баланс розсіювання теплоти людським тілом для двовузлової моделі людини має такий вигляд:

$$S_{sk} = K_{\min} \cdot (T_{cr} - T_{sk}) + c_{bl} \cdot V_{bl} \cdot (T_{cr} - T_{sk}) - E_{sk} - DRY; \quad (6)$$

$$S_{cr} = (M - E_{res} - W) - K_{\min} \cdot (T_{cr} - T_{sk}) - c_{bl} \cdot V_{bl} \cdot (T_{cr} - T_{sk}), \quad (7)$$

де S_{cr} , S_{sk} – накопичення енергії у ядрі та оболонці, Вт/м²; K_{\min} – коефіцієнт ефективної теплопередачі між ядром та оболонкою, що дорівнює 5,28 Вт/(м²·К); T_{cr} – температура ядра, К; T_{sk} – температура оболонки (шкіри), К; c_{bl} – питома теплоємність крові людини, Дж/(кг·К); V_{bl} – потік крові до шкіри, кг/(с·м²); E_{sk} – сумарні втрати теплоти шляхом випаровування із поверхні шкіри, Вт/м²; DRY – сухий теплообмін із поверхні тіла, Вт/м²; M – питома значення генерування теплоти за рахунок обміну речовин, Вт/м²; E_{res} – теплообмін випаровуванням під час дихання, Вт/м²; W – механічна робота, Вт/м².

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

$$\Sigma_{sk} = t_{sk} - 34,1; \quad (8)$$

$$\Sigma_{cr} = t_{cr} - 36,6, \quad (9)$$

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

На базі цих двох сигналів визначаються маса вологи, що генерується людиною та швидкість руху крові по судинах:

$$m_{reg.sw} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \Sigma_{cr} < 0 \cup \Sigma_{sk} < 0 \\ 250 + 100 \cdot \Sigma_{cr} & \end{cases}, \quad (10)$$

$$V_{bl} = \begin{cases} \frac{6,3 + 75 \cdot \sum_{cr}}{1 - 0,5 \cdot \sum_{sk}}, & \text{якщо } \sum_{cr} < 0 \cap \cup \sum_{sk} < 0 \\ 6,3 \end{cases} \quad (11)$$

Співвідношення (8)–(11) описують механізм терморегуляції, що полягає у розширенні та звуженні кровоносних судин і генеруванні вологи. Ґрунтуючись на співвідношеннях енергетичного балансу, для визначених параметрів навколишнього середовища розраховуються T_{cr} , T_{sk} та E_{sk} . Ці характеристики дають можливість на основі балансу ексергії визначити споживання ексергії людським тілом. Ексергетичний баланс терморегуляції поверхні людського тіла має вигляд:

$$Ex_m + Ex_{gen,cr} + Ex_{gen,sk} + Ex_{inh,air} + Ex_{abs,sk-cl} = Ex_{rad,dc} + Ex_{conv} + Ex_{exh,air} + Ex_{sw,ha} + Ex_{stored,cr} + Ex_{stored,sk} + Ex_{cons} \quad (12)$$

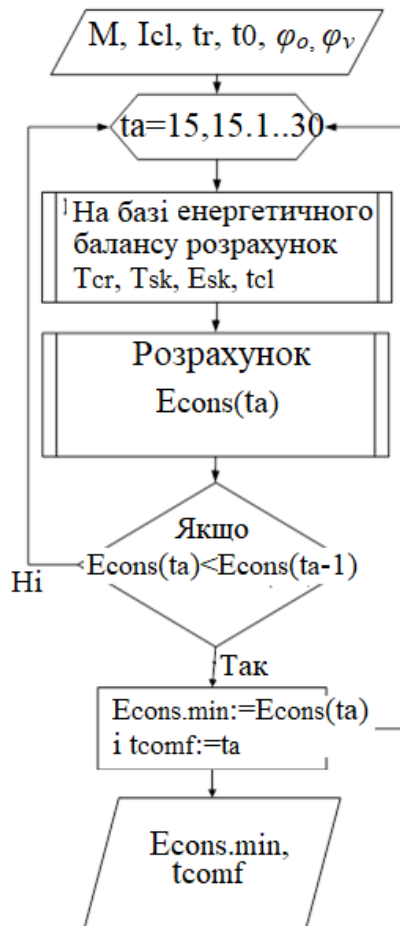


Рис.2 – Алгоритм розрахунку комфортної температури повітря у приміщенні відповідно до ексергетичного підходу

розроблено комп'ютерну модель, що визначає значення складових ексергетичного балансу механізму терморегуляції відповідно до параметрів навколишнього середовища, а також алгоритм, що дає змогу визначити комфортну температуру відповідно до ексергетичного підходу, який представлено на рис. 2. Оскільки людський організм функціонує найкраще за умови мінімуму

де Ex_m – питомий потік ексергії теплоти, який обумовлений обміном речовин, Вт/м²; $Ex_{gen,cr}$ – ексергія рідини, що генерується в ядрі за рахунок метаболізму, Вт/м²; $Ex_{gen,sk}$ – ексергія рідини, який генерується в оболонці за рахунок метаболізму, Вт/м²; $Ex_{inh,air}$ – ексергія вологого повітря, що вдихає людина, Вт/м²; $Ex_{abs,sk-cl}$ – ексергія випромінювання, що поглинається шкірою та одягом людини, Вт/м²; $Ex_{rad,dc}$ – ексергія випромінювання від поверхні тіла, Вт/м²; Ex_{conv} – ексергія, що передається конвекцією повітря, Вт/м²; $Ex_{exh,air}$ – ексергія вологого повітря, що видихає людина, Вт/м²; $Ex_{sw,ha}$ – ексергія водяної пари, що виникає за рахунок секрету шкіри, Вт/м²; $Ex_{stored,cr}$ – ексергія, що накопичується в ядрі, Вт/м²; $Ex_{stored,sk}$ – ексергія, що накопичується в оболонці, Вт/м²; Ex_{cons} – ексергія, що витрачається людським тілом на механізм терморегуляції Вт/м².

На базі математичної моделі ексергетичного та енергетичного балансів людського тіла

Ex_{cons} тому основним завданням є визначення мінімуму функції $Ex_{cons}(t_a)$, при заданих інших параметрах мікроклімату, а температура повітря, що відповідає цьому мінімуму, це комфортна температура повітря відповідно до ексергетичного підходу. Згідно із запропонованим алгоритмом мінімум функції однієї змінної визначається методом перебору. Для врахування впливу відбиття сонячної радіації та теплового випромінювання розроблено методику та комп'ютерну модель визначення радіаційної температури t_r на базі ефективних потоків внутрішніх поверхонь огорожень і приладу опалення. Середня радіаційна температура визначається як середньозважена по площах, а температура світлопрозорих конструкцій визначається так:

$$t_i = ((t_{im} + 273)^4 + \frac{0,179 \cdot 10^8 \cdot Q_{ef2i}}{F_i})^{0,25} - 273, \quad (13)$$

де t_{im} – температура огорожувальної конструкції, що визначається на основі моделі, яка враховує власний теплообмін огорожувальних конструкцій тепловим випромінюванням та сонячною радіацією, °C; Q_{ef2i} – ефективний потік сонячної радіації для i -ї огорожувальної конструкції, Вт; F_i – площа огорожувальної конструкції, м². Отже, запропонована методика розрахунку t_r в комплексі з ексергетичною моделлю терморегуляції людини дасть змогу визначати вплив суб'єктивних та об'єктивних параметрів теплового комфорту на енергоспоживання будівлі. Розвинуто методику ексергоекономічного аналізу системи ДЛК. Представлено два ексергоекономічних критерії для комплексного вибору джерела теплоти та огорожувальних конструкцій будівлі: перший критерій ви-

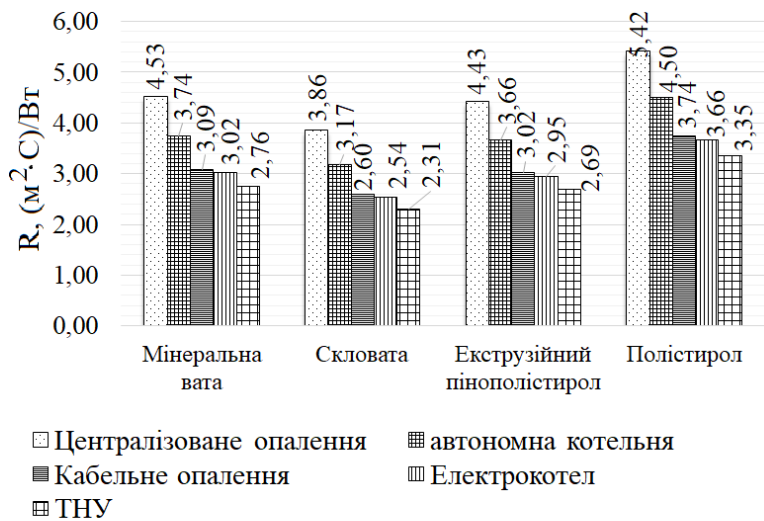


Рис. 3 – Залежність оптимального термічного опору від типу ізоляційного матеріалу та джерела теплоти

зрахуванням тенденцій щодо зміни вартості грошей та енергоносіїв в часі. Для аналізу обрано модель віртуальної кімнати в м. Києві, побудованої в 1981 році з однією зовнішньою стіною. Автором проведено ретроспективний аналіз зміни цін на енергоносії в Україні та світі. На рис. 3 і 4 представлено результати опти-

значає вартість втрат ексергії для забезпечення комфортних умов у будівлі за опалювальний період; другий показник оцінює вартість втрат ексергії для забезпечення комфортних умов у будівлі за 10 років і дасть змогу врахувати зміну вартості енергоносіїв в часі.

У третьому розділі представлено результати розрахунків інтегральної вартості системи ДК. Тобто представлені результати техніко-економічного обґрунтування термомодернізації будівлі в комплексі з вибором джерела теплоти із

міації, з огляду на які можна стверджувати, що витрати на систему із електрокотлом та ізоляцією типу пінополістирол будуть найменшими. Приклад наведено для глибини розрахунку 10 років. Доцільність використання певного ізоляційного матеріалу з економічної сторони обумовлена його вартістю та теплопровідністю. Показано вплив глибини розрахунку на інтегральну вартість системи ДК та на оптимальний термічний опір теплоізолюючого матеріалу.

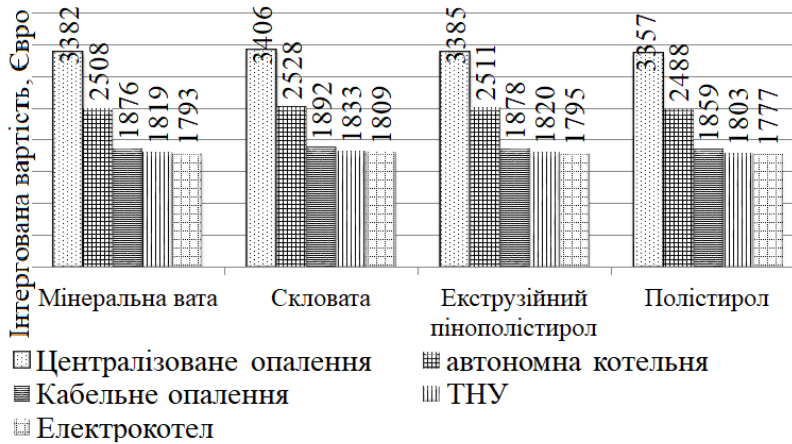


Рис. 4 – Залежність інтегральних дисконтованих витрат від типу ізоляційного матеріалу та джерела теплоти

Коли життєвий цикл проекту становить 10 років, тоді тенденції змінюються, і найвищі значення термічного опору характерні для централізованого тепlopостачання, потім автономної котельні, кабельного опалення, електрокотла та ТНУ. Інтегральні витрати в такому випадку зростають таким чином: централізоване опалення, автономна котельня, кабельне, ТНУ та електричне опалення. За допомогою методики визначення радіаційної температури на базі ефективних потоків внутрішніх поверхонь огорожень і приладу опалення проведено уточнення, що дає змогу знизити комфортну температуру в приміщенні в середньому на $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, а сумарну потужність теплових втрат моделі – на $2\div 3\%$.

У четвертому розділі наведено результати апробації ексергетичної моделі терморегуляції людини, показано вплив теплового захисту будівлі на показники теплового комфорту, розроблено регресійну модель визначення температури повітря у приміщенні, що відповідає енергетичним та ексергетичним умовам комфортності, для аналізу впливу суб'єктивних та об'єктивних параметрів теплового комфорту на споживання первинного палива, проаналізовано втрати енергії та ексергії через елементи системи ДК із різними варіантами джерел теплоти, на базі чого оцінено вплив показників комфорту на споживання ексергії/енергії системи в цілому. Для розрахунків обрано віртуальну модель людини із такими параметрами: $M=60\text{ Вт/м}^2$; $I_{clo}=0,155\text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт (1clo)}$. Графік залежності споживання ексергії людським тілом $E_{x_{cons}}$ від температури повітря у кімнаті t_a та середньої радіаційної температури t_r представлено на рис. 5 для точок, що відповідають мінімуму споживання ексергії, визначено показники PMV та PPD – це прогнозований процент незадоволених таким середовищем, основні показники тепловідчуттів людини відповідно до *EN ISO 7730*. Значення PMV знаходиться в межах від $(-0,34)$ та $(-0,42)$, що кореспондується з іншими дослі-

Встановлено, що для $\tau=5$ років послідовність зменшення для оптимального термічного опору та інтегральних витрат є однаковою і такою: централізоване тепlopостачання далі ТНУ, автономна газова котельня та кабельне електроопалення і електричний котел. Отже, для терміну п'ять років найменший термічний опір та витрати характерні для будівлі з електричним котлом.

дженнями, у яких мінімум споживання ексергії відповідає значенню $PMV=-0,611$, що відповідає тепловідчуттям «дещо прохолодно». Проведені порівняння залежності $t_a(t_r)$ (рис. 6) для таких моделей теплового комфорту людини: 1) ексергетична; 2) енергетична для різних значень PMV ; 3) модель Богословського. З метою порівняння та оцінки впливу умов комфортності на t_a визначено середньоквадратичне відхилення комфортної температури повітря у кімнаті у порівнянні з комфортною температурою, за якої прогнозовані тепловідчуття людини відповідатимуть індексу $PMV=0$ (тепловідчуття – «комфортно»).

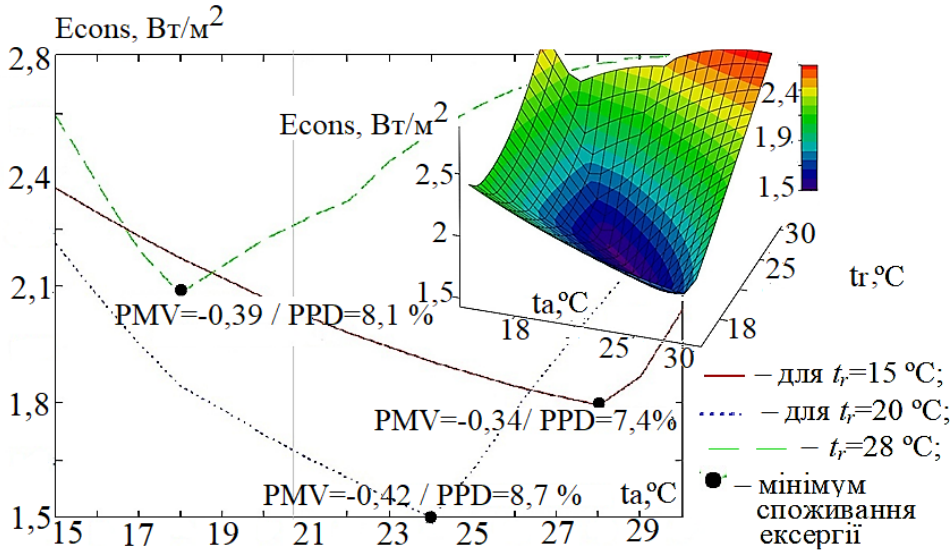


Рис. 5 – Графік залежності споживання ексергії людським тілом від температури повітря у кімнаті та середньої радіаційної температури

Енергетична модель людського тіла, для якої $PMV=0$, обрана базовою, оскільки є найпоширенішою і знаходяться в основі EN ISO 7730. Найвище значення середньоквадратичного відхилення комфортної температури повітря характерне для моделі з $PMV=1$ та -1 і становить $7,3^\circ$ та $7,2^\circ\text{C}$ відповідно. Середньоквадратичне відхилення для моделі Богословського дорівнює $5,1$ та $5,7^\circ\text{C}$, для моделі з $PMV=-0,5$ та $0,5$; $-3,7$ та $3,8^\circ\text{C}$ відповідно. Найнижче значення

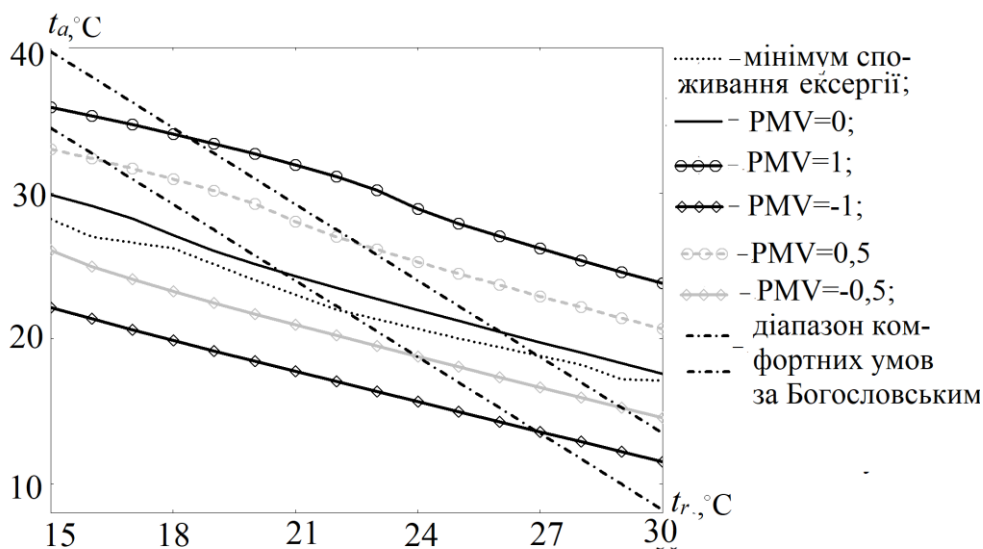


Рис. 6 – Залежність середньої радіаційної температури t_r повітря від температури повітря у кімнаті t_a для моделей теплового комфорту

середньоквадратичного відхилення відповідно до ексергетичної моделі теплового комфорту і рівне $1,4^\circ\text{C}$. Таким чином, за допомогою моделей визначено зв'язок між забезпеченням умов комфортності і досягнутою t_a . Для отримання регресійної

моделі проведено чисельний експеримент типу p^k , де число факторів $k=5$, число рівнів $p=2$, число дослідів $N=2^5=32$. Оцінювався вплив таких факторів на ком-

фортності і досягнутою t_a . Для отримання регресійної моделі проведено чисельний експеримент типу p^k , де число факторів $k=5$, число рівнів $p=2$, число дослідів $N=2^5=32$. Оцінювався вплив таких факторів на ком-

фортну t_a : відносна вологість φ , метаболізм M , термічний опір одягу людини I_{clo} , t_r , прогнозована середня оцінка тепловідчуттів людини PMV (для енергетичної моделі), температура зовнішнього повітря T_0 (для ексергетичної моделі). Рівні варіювання та базові значення яких представлені у таблиці 1.

Оцінка впливу цих факторів покаже можливість зниження енергоспоживання за рахунок зниження t_a . Рівняння регресії для енергетичної моделі без врахування сумісного впливу факторів на основі результатів чисельного експерименту для кодovаних значень факторів матиме такий вигляд:

$$t_a = -5,81 \cdot \bar{X}_1 + 6,4 \cdot \bar{X}_2 - 2,53 \cdot \bar{X}_3 - 4,96 \cdot \bar{X}_4 - 0,48 \cdot \bar{X}_5 + 23,68 \quad , \quad (14)$$

де \bar{X}_1 – середня радіаційна температура t_r ; \bar{X}_2 – PMV ; \bar{X}_3 – метаболізм M ; \bar{X}_4 – термічний опір одягу людини, I_{clo} ; \bar{X}_5 – відносна вологість повітря, φ .

Використовуючи рівняння регресії, можна стверджувати, що вплив факторів на комфортну t_a зростає у наступному ряді: φ , M , I_{clo} , t_r , PMV . Для підвищення точності розрахунків розроблено регресійну модель для $PMV=0$:

$$t_a = -6,01 \cdot \bar{X}_1 - 2,51 \cdot \bar{X}_3 - 4,96 \cdot \bar{X}_4 - 0,42 \cdot \bar{X}_5 + 23,82. \quad (15)$$

Модель (15) дозволить підвищити точність визначення комфортної температури у порівнянні із моделлю (14), оскільки нормований коефіцієнт детермінації зростає від 0,95 до 0,99. Рівняння регресії для ексергетичної моделі без врахування сумісного впливу факторів на основі результатів експерименту, для кодovаних значень факторів матиме такий вигляд:

$$t_a = -4,58 \cdot \bar{X}_1 - 0,57 \cdot \bar{X}_2 - 4,43 \cdot \bar{X}_3 - 5,92 \cdot \bar{X}_4 - 0,397 \cdot \bar{X}_5 + 21,44, \quad (16)$$

Використання рівняння (16) значно спростить розрахунки потреби на опалення. Така модель показує, що вплив факторів на комфортну t_a , відповідно до ексергетичного підходу зростає у такому ряді: φ , T_0 , M , t_r , I_{clo} . Перевірено значимість знайдених коефіцієнтів регресій (14)–(16) та проведено їх оцінку на адекватність на базі критерію Фішера та Стюдента. Встановлено, що рівняння регресії є адекватними, а обрані фактори та коефіцієнти регресії – статистично значимі й мають суттєвий вплив на комфортну t_a . Визначені коефіцієнти множинної кореляції вказують на щільний кореляційний зв'язок комфортної t_a з факторами. Розроблено алгоритм, що дає змогу інтегрувати керуючий вплив людини у складну систему ДК (рис.7). Особливість цього алгоритму полягає у тому, що вперше ексергетична модель людини включена у складну систему ДЛК шляхом визначення комфортної t_a , що у свою чергу відповідатиме рівню

Таблиця 1 – Варіювання факторів для енергетичної та ексергетичної моделі

Фактор	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	-1	0	1	
t_r, X_1	15	22,5	30	7,5
$PMV(T_0), X_2$	-1 (263)	0 (273)	1 (283)	10
M, X_3	50	60	70	10
I_{clo}, X_4	0,075	0,155	0,2325	0,075
φ, X_5	40	50	60	10

комфورتу, не нижчому за необхідний рівень очікувань PMV_n , який визна-

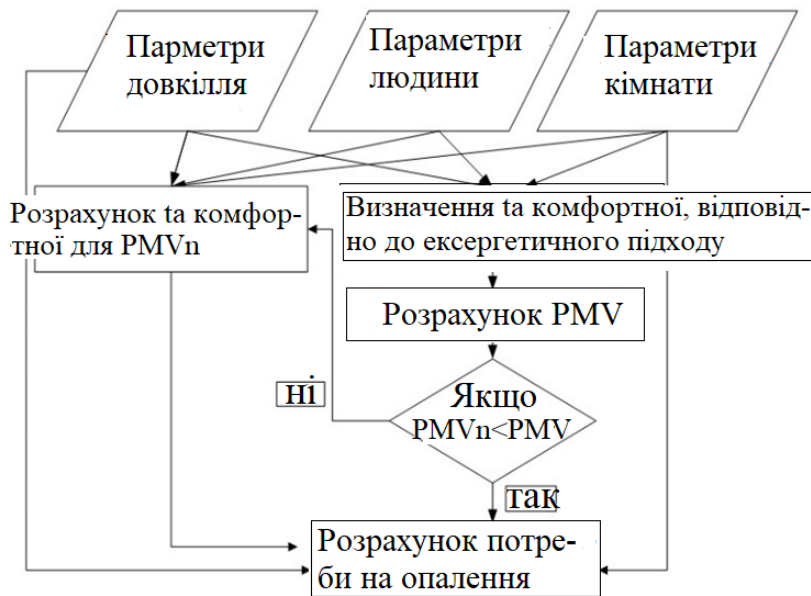


Рис. 7 – Блок-схема інтегрування розрахунків моделі людини у складну систему ДК

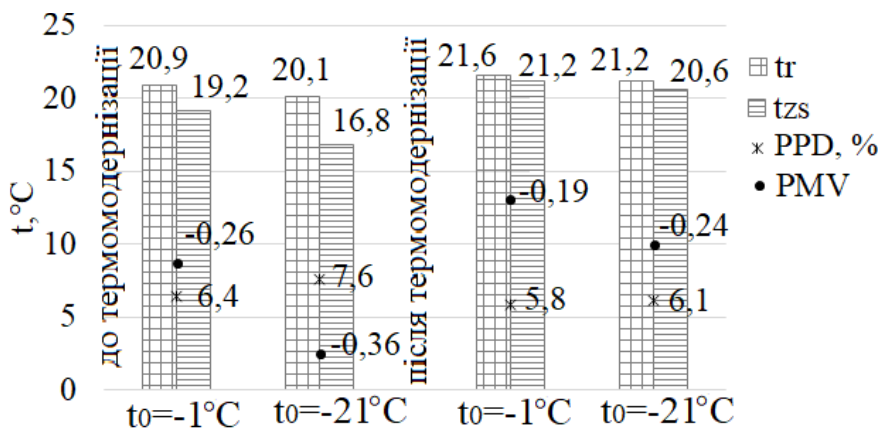


Рис. 8 – Зміна середньої радіаційної температури та рівня забезпечення комфортних умов при термомодернізації

міщення зростає на $0,5^\circ\text{C}$ (для температури зовнішнього повітря $t_0=-1^\circ\text{C}$) та на $1,2^\circ\text{C}$ ($t_0=-21^\circ\text{C}$), температура t_a приймається рівною 20°C . Це обумовлено зростанням t_{zs} на 1 та $3,7^\circ\text{C}$ відповідно. Для параметрів людини $M=70\text{ Вт/м}^2$ та $I_{cl}=1\text{ clo}$ оцінено зміну PMV та PPD при термомодернізації. Встановлено, що для $t_0=-1^\circ\text{C}$ PMV змінюється від $(-0,26)$ до $(-0,19)$, а PPD – від $6,4$ до $5,8\%$, для $t_0=-21^\circ\text{C}$: PMV – від $(-0,36)$ до $(-0,24)$, для PPD – від $7,6$ до $6,1\%$. Отже, проведена термомодернізація будівлі дає змогу підвищити категорію будівлі, щодо забезпечення комфортних умов з II-ї до I-ї за рахунок підвищення t_r . Вплив категорії будівлі щодо забезпечення комфортних умов на t_r та на потребу на опалення до термомодернізації та після, представлено на рис. 9. Отже, зміна від I-ї до II-ї категорії будівлі обумовлює різницю в потребі на опалення на $9,4$ та на $9,7\%$ для будівлі до термомодернізації та після відповідно. Термомодернізація у свою чергу обумовлює зміну потреби на опалення на 53% . А їх сумісний вплив забезпечує зміну потреби на опалення на 68% . Результати розрахунку

категорією будівлі. Якщо комфортна температура відповідно до ексергетичного підходу забезпечує $PMV < PMV_n$, тоді розрахунок комфортних умов відбуватиметься згідно з енергетичним підходом. Для аналізу впливу термомодернізації на рівень теплового комфорту, а також на середню t_r для віртуальної моделі приміщення визначено змінну t_r , а також температури на внутрішній поверхні зовнішньої стіни t_{zs} для різних значень температури довкілля, а саме мінімальної та середньої за опалювальний період рис. 8. Показано, що при зміні термічного опору огорожувальних конструкцій від встановлених у 80-х роках до сучасних вимог, t_r при-

чутливості потреби на опалення до впливу різних факторів показали, що вплив на потребу на опалення для ексергетичної моделі теплового комфорту спадає у такій послідовності: T_0 , M , I_{clo} , надходження сонячної радіації, термічний опір огорожувальних конструкцій та φ відповідно. Вплив на потребу на опалення для енергетичної моделі спадає відповідно: T_0 , M , надходження сонячної радіації, I_{clo} , термічний опір

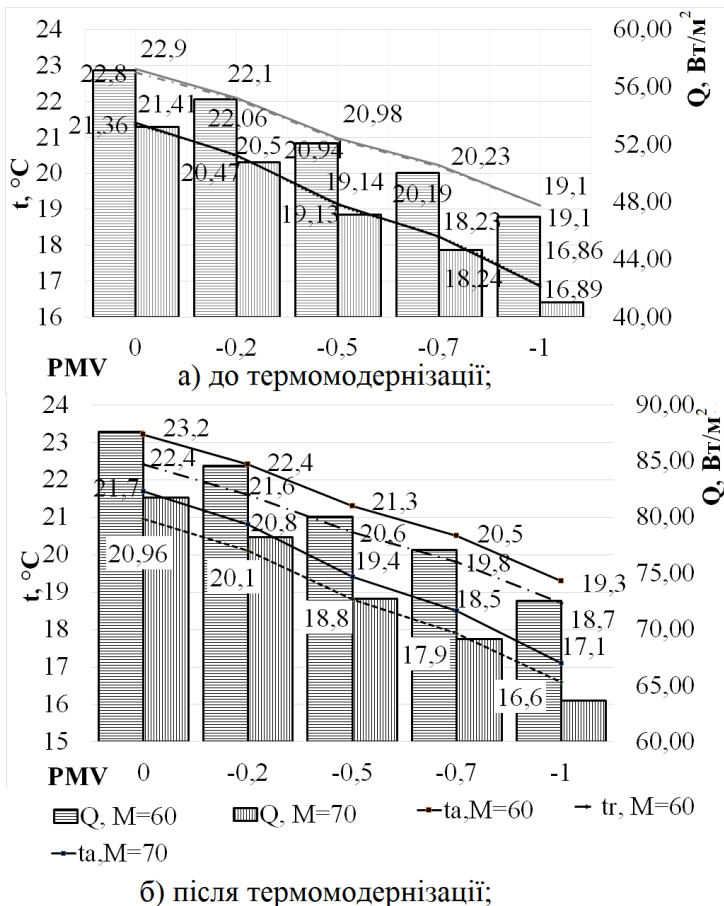


Рис.9 – Залежність потреби на опалення від категорії будівлі щодо забезпечення комфортних умов

огорожувальних конструкцій, PMV та φ . Розрахунок потреби на опалення з урахуванням моделі теплового комфорту людини дає змогу визначити за допомогою перевідних коефіцієнтів для різних джерел теплоти споживання первинного палива системою ДЛК, із врахуванням сучасних вимог до мікроклімату в приміщеннях. Результати розрахунку споживання первинного палива системою ДЛК, де в якості джерела теплоти обрано централізоване опалення, опалювальний прилад із температурним графіком теплоносія $90/75^{\circ}\text{C}$, а термічний опір оболонки будівлі відповідає нормативам 2008 р., показали, що споживання ексергії первинного палива при зміні суб'єктивних параметрів мікроклімату від точки 1 ($M=60 \text{ Вт/м}^2$, $I_{clo}=0,5 \text{ clo}$) до точки 2 ($M=70 \text{ Вт/м}^2$, $I_{clo}=1 \text{ clo}$) змінюється на 27%/18%, при цьому комфортна температура повітря змінюється на 25%/17% при застосуванні ексергетичного/енергетичного підходів до забезпечення комфортних умов відповідно. Застосування ексергетичного підходу до забезпечення комфортних умов у порівнянні з енергетичним дасть середньорічну економію для 9-и поверхового житлового багатоквартирного будинку (спорудженого у 2016 році) у розмірі 60 тис.грн., а зміна категорії будівлі з I-ої до II-ої – 120 тис.грн за умови використання тарифів централізованого опалення у м. Києві 2017р.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить нові науково обґрунтовані результати вдосконалення і подальшого розвитку методів та засобів аналізу енерго- і ексерго-ефективності складної системи ДЛК і одночасного забезпечення комфортних умов шляхом використання моделей теплового комфорту людини. У процесі виконання роботи отримано наступні науково-практичні результати:

- запропоновано розглядати будівлю, як енергетичну систему в комплексі з математичною моделлю людини, що дає змогу більш точно визначити характеристики ефективності енергоспоживання за умов обмежень, спричинених забезпеченням необхідної якості мікроклімату;
- запропоновано методику визначення інтегральної вартості та показників енергоефективності будівлі як єдиної енергетичної системи, побудовану на базі енергетичного та ексергоекономічного підходів, та методику обґрунтування термомодернізації будівлі в комплексі з вибором джерела теплоти із врахуванням тенденцій щодо зміни вартості грошей та енергоносіїв в часі;
- показано вплив факторів, які дають можливість знизити комфортну температуру повітря, а отже, і енергоспоживання будівлі;
- розроблено підходи щодо розрахунку середньої радіаційної температури, які адаптовані до використання при аналізі усїєї системи ДЛК;
- розроблено математичну модель людини, що дає змогу визначити комфортну температуру повітря у приміщенні відповідно до другого закону термодинаміки та алгоритм розрахунку комфортної температури повітря відповідно до ексергетичного підходу, в основі якого лежить метод перебору під час визначення мінімального споживання ексергії людським тілом та на його базі комп'ютерну модель;
- створено регресійні моделі для розрахунку комфортної температури повітря у приміщенні відповідно до ексергетичного та енергетичного підходів і запропоновано блок-схему інтегрування керуючого впливу людини у модель ДК;
- показано, що ексергетичний підхід щодо забезпечення комфортних умов дає значення комфортної температури, що є нижчою від комфортної температури відповідно до енергетичного підходу в центрі матриці планування експерименту на 2,4 °С;
- показано сумісний вплив термомодернізації та зміни категорії будівлі щодо забезпечення комфортних умов на потребу на опалення будівлі, зменшення якої при розглянутих умовах загалом більш ніж на 13 % обумовлено зниженням температури повітря у приміщенні за рахунок зниження рівня теплового комфорту та підвищення середньої радіаційної температури;
- визначено кількісно врахування належного рівня вимог до теплового комфорту, що дасть змогу у певних випадках змінити споживання ексергії системою в межах 25 до 27 %.

Результати роботи передано в ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» для застосування при розробці норм щодо ефективного використання енергії в будівлях, в Центр ресурсоефективного та чистого виробництва для техніко-економічного обґрунтування вибору джерела теплоти, використано у навчальному процесі КПІ імені Ігоря Сікорського на кафедрі теплотехніки та енергозбереження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Праховник А.В., Дешко В.І., Закладний О.М., Шовкалюк М.М., Буяк Н.А. та ін. Практичний посібник з енергозбереження для об'єктів промисловості, будівництва та житлово-комунального господарства. Луганськ: «Місячне сяйво», 2010. 696 с. **(колективна монографія)**. Автор розробила методику

вибору джерела теплоти та огорожувальних конструкцій із врахуванням зміни вартості енергоносіїв та грошей у часі.

2. Dешко V.I., Буяк N.A. A model of human thermal comfort for analyzing the energy performance of buildings. *Eastern European journal of enterprise technologies*, 2016. V. 4/8 (82). P. 42–47. ISSN 1813-5420. (**фахове видання**, включене до бази даних **Scopus**, **Index Copernicus** та ін). Автор розробила комп'ютерну модель теплового комфорту людини та порівняла існуючі моделі.

3. Buyak N.A., Dешко V.I., Sukhodub I.O. Buildings energy use and human thermal comfort according to energy and exergy approach. *Energy and buildings*, 2017. Vol.146. P. 172–181. (**іноземне видання**). Автору належать розробка алгоритму визначення комфортної температури в приміщенні та оцінка чутливості потреби на опалення до параметрів, що залежать від людини та будівлі.

4. Dешко V.I., Buyak N.A. Building heat source choice using exergoeconomic approach. *Energy, energy saving and rational nature use*, 2017. P. 50–60. (**іноземне видання**). Автору належить розробка методики вибору джерела теплоти в комплексі з огороженнями на базі ексергоекономічного підходу.

5. Дешко В.І., Буяк Н.А. Вплив теплового захисту будівлі на показники теплового комфорту. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2015. №153. С.121–128. ISSN 1994-7852. (**фахове видання**, включене до бази даних **Index Copernicus**). Автор провела оцінку впливу термічного опору огорожувальних конструкцій на показники теплового комфорту.

6. Дешко В.І., Буяк Н.А., Білоус І.Ю. Вибір теплового захисту та джерела тепла із врахуванням комфортних умов у будівлі. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. Серія: Технічні науки, 2015. № 5. С. 71–80. (**фахове видання**, включене до бази даних **Ulrich's Periodical Directory**). Автор розробила комп'ютерну модель для вибору джерела теплоти в комплексі з огорожувальними конструкціями, що враховує комфортні умови.

7. Дешко В.І., Буяк Н.А. Комфортні умови у приміщенні з урахуванням впливу сонячної радіації. *Збірник наукових праць: галузеве машинобудування, будівництво*, 2016. №1. С. 197–204. ISSN 2409-9074. (**фахове видання**, включене до бази даних **Index Copernicus** та **Ulrich's Periodical Directory**). Автор розробила моделі розрахунку середньої радіаційної температури.

8. Дешко В.І., Буяк Н.А. Показники опалення будівель і температурні умови комфортності. *Промислова теплотехніка*, 2010. №1(32). С. 66–70. ISSN 0204-3602. (**фахове видання**). Автором розроблена модель розрахунку середньої радіаційної температури та визначена комфортна температура повітря.

9. Дешко В.І., Буяк Н.А., Долгополов І.С, Тучин В.Т. Енерго- і ексергоефективність систем теплопостачання будівлі. *Енергетика, економіка, технології, екологія*, 2009. №2. С.32–41. ISSN 1813-5420. (**фахове видання**). Автору належать розробка та аналіз енергетичних та ексергетичних показників енергоефективності ДК.

10. Дешко В.І., Буяк Н.А. Вплив глибини розрахунку на сукупні інтегровані витрати теплової ізоляції будівлі та джерела теплоти. „Вісник СумДУ”.

Серія: Технічні науки, 2009. №4. С. 211–217. **(фахове видання)**. Автором оцінено вплив глибини розрахунку на функцію інтегральної вартості.

11. Дешко В.І., Буяк Н.А. Економічно доцільний тепловий захист будівлі з різними джерелами теплоти. *Наукові вісті Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”*, 2009. №3. С. 74–81. – ISSN 1810-0546. **(фахове видання)**. Автором запропоновано функцію інтегральної вартості для визначення оптимального термічного опору огорожувальних конструкцій.

12. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Економічно доцільний тепловий захист будівлі з різними джерелами теплоти» / В.І. Дешко, Н.А. Буяк, М.М. Шовкалюк. – № 69784; заявл. 11.11.2016; зареєстр. 16.01.2017. Автору належить розробка методики вибору джерела теплоти в комплексі з огорожувальними конструкціями.

13. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Моделі теплового комфорту та енергоспоживання будівлі» / В.І. Дешко, Н.А. Буяк, І.О. Суходуб. – № 69785; заявл. 11.11.2016; зареєстр. 16.01.2017. Автор розробила модель для аналізу показників енергоефективності системи ДЛК.

14. Дешко В.І., Буяк Н.А. Вплив приладів опалення на енергоефективність будинків. *Вісник Харківського національного університету сільського господарства імені Петра Василенка: праці міжнар. наук.-практ. конф.*, (8-9 жовтня 2009 р.), 2009. №87. С. 10–12. ISSN 5-7987-0176X. Здобувачеві належить оцінка впливу опалювальних приладів на потребу на опалення будівлі.

15. Дешко В.І., Буяк Н.А. Влияние комфортных условий на интегрированную стоимость отопления. *Промышленная теплотехника*, 2009. №7(31). С. 63–64. ISSN 0204-3602. Автор оцінила вплив опалювальних приладів на інтегральну вартість системи ДК.

16. Дешко В.І., Буяк Н.А. Вплив життєвого циклу проекту на економічно доцільний тепловий захист будівлі з різними джерелами: матеріали V Міжнародної ювілейної науково-практичної конференції «Екологія. Економіка. Енергозбереження». Суми: Вид-во «СумДУ», 2009. С. 76–78. Автор оцінила вплив життєвого циклу проекту на інтегровану вартість системи ДК.

17. Дешко В.І., Буяк Н.А. Моделирование влияния солнечной та теплової радіації на комфортну температуру у приміщенні. Проблеми і перспективи розвитку академічної та університетської науки: збірник наукових праць за матеріалами VII Всеукраїнської науково-практичної конференції (8 – 11 груд. 2015 р., м. Полтава). Полтава: ПолтНТУ, 2015. С. 3–6. Автор оцінила вплив надходження сонячного випромінювання на середню радіаційну температуру.

18. Дешко В.І., Буяк Н.А. Аналіз споживання енергії в комплексі джерело тепла-людина-огорожуючі конструкції. IX МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ПРОБЛЕМИ ПРОМИСЛОВОЇ ТЕПЛОТЕХНІКИ» (20 – 23 жовтня 2015 р., м. Київ). Київ: Національна академія наук України, Інститут технічної теплофізики, 2015. С. 109–110. Автором проаналізовано зміну енергоспоживання будівлі із врахуванням комфортних умов.

19. Дешко В.І., Буяк Н.А., Іщенко К.В. Економічно доцільний вибір джерела теплоти для гуртожитка. Матеріали науково-технічної конференції Ін-

ституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський Політехнічний Інститут» ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА. Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2012. С. 433–442. *Автор розробила модель та проаналізувала результати щодо економічного доцільного джерела теплоти.*

20. Дешко В.І., Буяк Н.А. Ексергетична модель теплового комфорту людини в зимовий період. Матеріали науково-технічної конференції Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський Політехнічний Інститут» ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА. Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2016. С. 89–96. *Автору належить аналіз та порівняння складових ексергетичного балансу людини для зимового та літнього періоду.*

21. Буяк Н.А, Іщенко К. Оцінка енергоефективності гуртожитку на основі ексергетичних показників. Матеріали XII Всеукраїнської студентської науково-технічної конференції „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“ (19-20 квітня 2011 року). Тернопіль: ТНТУ, 2011. Том 1. С. 237. *Автор розробила ексергетичні показники та застосувала їх для оцінки енергоефективності гуртожитку.*

22. Буяк Н. Вплив характеристик теплового захисту та джерела тепла на функцію інтегрованих витрат. Матеріали X Всеукраїнської студентської науково-технічної конференції „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“ (23-24 квітня 2009 року). Тернопіль : ТДТУ, 2009. Том 1. С. 220. *Автором проаналізовано чутливість функції інтегральної вартості до характеристик теплового захисту та джерела теплоти.*

АНОТАЦІЯ

Буяк Н.А. Оцінювання ефективності енергетичної системи будівлі в умовах теплового комфорту. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2017.

Дисертація присвячена розробці та розвитку методів оцінки ефективності енергосистеми будівлі в умовах теплового комфорту. Розроблено методику вибору джерела теплоти в комплексі з огорожувальними конструкціями будівлі на базі функції інтегральної вартості, що дає змогу враховувати зміну вартості енергоносіїв та грошей у часі. Розроблена комп'ютерна модель, що ґрунтується на ексергетичній та енергетичній концепції та дає змогу оцінювати енергетичні показники теплового комфорту, а саме *PMV* та *PPD*. Проведено числові дослідження, на базі яких розроблено регресійну модель для визначення комфортної температури повітря у кімнаті, що дасть можливість забезпечувати мікроклімат у приміщенні відповідно до ексергетичного підходу. Створено модель для аналізу показників енергоефективності системи «джерело теплоти – людина – огорожувальні конструкції» та визначено енергопотребу на опалення залежно від параметрів будівлі та людини.

Ключові слова: джерело теплоти, енергопотреба на опалення, радіаційна температура, ексергія, чиста приведена вартість.

АННОТАЦІЯ

Буяк Н.А. Оценка эффективности энергетической системы здания в условиях теплового комфорта. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев 2017.

Диссертация посвящена разработке и развитию методов оценки эффективности энергосистемы здания в условиях теплового комфорта. Разработанная методика выбора источника теплоты в комплексе с ограждающими конструкциями здания на базе функции интегральной стоимости позволяет учитывать изменение стоимости энергоносителей и денег во времени. Разработана компьютерная модель, основанная на эксергетической и энергетической концепции, которая позволяет оценивать энергетические показатели теплового комфорта, а именно *PMV* и *PPD*. Проведены численные исследования, на базе которых разработана регрессионная модель для определения комфортной температуры воздуха в комнате, что позволит обеспечивать микроклимат в помещении в соответствии с эксергетическим подходом. Создана модель для анализа показателей энергоэффективности системы «источник теплоты – человек – ограждающие конструкции» и определена потребность на отопление в зависимости от параметров здания и человека.

Ключевые слова: источник теплоты, потребность на отопление, радиационная температура, эксергия, чистая приведенная стоимость.

ABSTRACT

Buyak N. A. Evaluation of building energy system efficiency in thermal comfort conditions. – Manuscript.

Thesis of Candidate Degree (PhD) in Technical Sciences on specialty 05.14.01 – Energy Systems and Complexes. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2017.

The thesis is devoted to the development of methodical aspects, methods and models of a complex "heat source – human – building envelope" system, taking into account the influence of building and thermal comfort parameters during the design, operation and modernization phases; methods development of the heat source choice in a complex with building envelope thermal properties.

Detailed analysis of the regulatory framework for buildings energy efficiency and microclimate conditions is given. The analysis of developed approaches for increasing building energy efficiency as an energy system, while maintaining thermal comfort, is carried out. It is established that in the case of a comprehensive approach to energy saving measures choice for the whole building it is recommended to use human thermal comfort models that take into account subjective and objective influential factors. The method of choosing a heat source in a complex with building envelope based on the integrated value function is developed, which allows taking

into account the change in the cost of energy and money in time. Energy, exergy and exergo-economic indicators have been developed, which allow estimating the system "heat source – building envelope" energy efficiency.

The analysis of human thermal comfort models has shown the necessity of creating a computer based model using exergy concept that allows estimating energy indicators of thermal comfort, namely *PMV* and *PPD*. The approaches used for calculating the space mean radiant temperature are developed, which are adapted for use in the analysis of the whole system "heat source – human – building envelope". Numerical modeling is carried out, on the basis of which a regression model for determining the comfortable air temperature in the space is developed, which will allow providing the microclimate parameters in accordance with the exergy concept.

It was shown that the exergy concept of providing comfortable conditions gives the value of a comfortable air temperature that is lower than the comfortable air temperature in accordance with the energy approach in the center of the experiment planning matrix for 2.4 °C. An algorithm that allows to integrate the human controlling influence into a complex system of "heat source – building envelope" was developed, the feature of which is that human exergetic model for the first time is included in a complex system of "heat source – building envelope", by definition of a comfortable space air temperature, which in turn corresponds to a level of comfort not lower than the required level of expectations.

A model for the analysis of the energy efficiency indicators of the "heat source – human – building envelope" system was developed and the building heating need was determined depending on the parameters of the building and human. The results of calculating the sensitivity of the energy need for heating to the influence of various factors have shown that the effect on the energy need for heating using exergy thermal comfort model decreases in the following sequence: outdoor air temperature, metabolism, solar radiation, building envelope thermal resistance and indoor air relative humidity respectively. The influence on the energy need for heating using energy model decreases respectively: outdoor air temperature, metabolism, solar radiation, building envelope thermal resistance, *PMV* and indoor air relative humidity. The influence of thermomodernization on the change of the mean radiant temperature in the space and on the person's thermal sensation is estimated. It was established that building thermomodernization allows increasing the category of the building, in order to provide comfortable conditions, from the 2nd to the 1st, due to the increase of the average radiant temperature of the spaces. The joint effect of thermomodernization and the change of the building category is shown for the building energy need for heating, the reduction of which under the considered conditions in general is more than 13% due to lower air temperature in the space, lower thermal comfort and an increase in mean radiant temperature. It is quantitatively determined that taking into account the appropriate level of the requirements for thermal comfort, which establishes the person, will allow in certain cases to change the system exergy consumption for 25-27%.

Key words: heat source, energy need for heating, radiant temperature, exergy, net present value.