НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ НАН УКРАЇНИ

ШЕВЧЕНКО ОЛЕНА МИКОЛАЇВНА
СУХОДУБ ІРИНА ОЛЕГІВНА
БУЯК НАДІЯ АНДРІЇВНА
БОЖКО ІГОР КОСТЯНТИНОВИЧ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ТА УПРАВЛІНСЬКІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ

Київ – 2019

Мета роботи - підвищення рівня енергоефективності будівель шляхом удосконалення існуючих і розробки інноваційних управлінських методів оцінювання енергозбереження; розробка та реалізація новітніх систем енергозабезпечення будівель; впровадження системи енергетичного менеджменту. Дослідження виконано з урахуванням енергетичних, економічних та термоекономічних параметрів об'єктів управління на базі енергетичного рейтингу; з урахуванням взаємозв'язку джерел генерації енергії теплового захисту та обраного рівня теплового комфорту приміщень; розробки динамічних моделей теплового стану будівель та інженерних систем енергозабезпечення**.**

Об'єкт дослідження - процеси тепло- та масообміну в будівлях, енергоспоживання і енергозбереження та оцінювання ефективності енерговикористання об'єктами вищих навчальних закладів (ВНЗ), а також процеси перетворення енергії та ексергії у складній системі «джерело теплоти – людина – огороджувальні конструкції будівлі».

Предмет дослідження – методи і показники оцінювання тепломасообмінних процесів, енергоспоживання, енергоефективності будівель в цілому та її окремих елементів/систем.

Наукова новизна: У представленій роботі вдосконалено існуючі та розроблені інноваційні підходи енергоменеджменту; створено систему оптимізації та управління процесами енергоспоживання та енергозбереження закладів освіти, вперше запропоновано та обґрунтовано врахування зміни умов комфортності при термомодернізації будівель шляхом застосування моделі теплового комфорту, розроблено математичні моделі для динамічного моделювання теплового стану будівлі та її інженерних систем, експериментально досліджено та доведено ефективність застосування теплонасосних технологій для опалення громадських будівель.

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Полягає у вдосконаленні існуючих та розробці нових підходів, застосування, яких дає можливість поліпшити систему управління ПЕЕ галузі освіти, визначити енергетичний рейтинг та провести оцінювання рівня енергоефективності ВНЗ, визначити шляхи підвищення енергоефективності, планувати обґрунтовані обсяги витрат на енергоносії, підвищити об'єктивність і оперативність моніторингу та аналізу енерговикористання, процесів енергетичного обстеження, зокрема:

- запропоновано концептуальну три-рівневу модель управління ПЕЕ в галузі освіти та надано рекомендації по її впровадженню, реалізацію моделі управління на другому (ЗВО) та третьому (будівля ЗВО) рівнях апробовано в КПІ ім. Ігоря Сікорського;
- розроблена математична модель визначення питомих показників електроспоживання на n-видах площ підрозділів, розосереджених в комплексі будівель ЗВО передана та використовується службою енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського;
- 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 та параметрів теплового захисту;
- створена методика вибору теплового захисту огороджувальних конструкцій будівлі у комплексі з джерелом генерації теплової енергії, яка дає змогу системно підходити до економічного обґрунтування проектно-вишукувальних рішень;
- запропоновано ексергетичний підхід до будівлі в цілому, що дає змогу оптимізувати використання енергії для будівлі як при будівництві, так і при експлуатації, тобто впродовж всього життєвого циклу;
- динамічні моделі теплового стану будівлі можуть використовуватися для оптимізації переривчастих режимів роботи системи опалення з точки зору економії теплової енергії та додаткових капіталовкладень на систему опалення;
- отримані експериментальні та розрахункові дані по інтегральним характеристикам теплоутилізаторів систем вентиляції можуть бути використані при виборі систем вентиляції, а визначені локальні умови для конденсації та розвитку процесу утворення інею в часі – для використання при проектуванні та експлуатації подібних систем вентиляції;
- на основі двох теплонасосних установок досліджено процеси перетворення теплової енергії в них та вплив типу джерела низькопотенційної теплоти на тепловий режим приміщень адміністративної будівлі, проведено дослідження та отримано експериментальні дані роботи системи опалення адміністративної будівлі під час інтеграції теплонасосних технологій в її систему опалення, розраховано середній за опалювальний період коефіцієнт перетворення теплового насоса та економію теплової енергії при реалізації такої системи.

Концептуальна модель управління процесами енергоспоживання та енергозбереження об’єктів галузі освіти

<u>В роботі представлено комплекс моделей для реалізації задач управління на виділених рівнях</u>

ПЕЕ – процеси енергоспоживання та енергозбереження

І РІВЕНЬ - ГАЛУЗЕВОГО УПРАВЛІННЯ
Модель оцінювання енергоефективності вищих навчальних закладів

ІІ РІВЕНЬ – МІСЦЕВОГО УПРАВЛІННЯ (НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД)
Модель визначення питомих показників електроспоживання на *n* – видах площ підрозділів, розосереджених в комплексі будівель ВНЗ

Математична постановка задачі

Нехай досліджувана система складається зі скінченної множини K корпусів ВНЗ, $K = \{K_j \mid j = \overline{1,m}\}$, де m – кількість корпусів. Кожний навчальний корпус K_j характеризує скінчена множина Φ_j підрозділів, що в ньому розміщені $\Phi_j = \{\Phi_{ji} \mid i = \overline{1,l}\}$, де l – кількість підрозділів j-го корпусу, які в свою чергу характеризуються скінченою множиною Π_{ji} площ $\Pi_{ji} = \{\Pi_{jik} \mid k = \overline{1,n}\}$, де n – кількість видів площ.

Величину планового споживання j-го корпусу позначимо через E_j, кВт·год; базове питоме споживання k-го виду площі позначимо e_k, кВт·год/м^2; площу k-го виду i-го підрозділу в j-му корпусі позначимо через S_{jik}, м^2. Введемо коефіцієнт впливу α_{ik} для кожного підрозділу кожного виду площі.

Планове електроспоживання j-го навчального корпусу може бути розраховане при відомих величинах питомого електроспоживання на n – видах площ за формулою:

$$E_j = \sum_{i=1}^{l}\sum_{k=1}^{n} \alpha_{ik} \cdot e_k \cdot S_{jik} \qquad \text{або} \qquad E_j = \sum_{k=1}^{n} e_k \cdot S_{jk} + e_1 \cdot \gamma \cdot \Delta S_{j1}$$

Алгоритм розв'язання задачі

Крок 1. Формуємо матрицю розподілу площ всередині навчальних корпусів.

Нехай розподіл площ в межах навчального корпусу представлений наступними її видами: навчальні лабораторії та комп'ютерні класи; адміністративні площі; навчальні аудиторії; наукові; площі інших організацій (оренда); допоміжні.

Крок 2. Розраховуємо умовно додаткову площу лабораторій ΔS_{j1} в *j*-й будівлі навчального корпусу

Крок 3. Формуємо матрицю електроспоживання навчальних корпусів.

Крок 4. Функціонал задачі:

$$F(e_k, \gamma) = \sum_{j=1}^{m} (E_j^* - e_1 \cdot \gamma \cdot \Delta S_{1j} - \sum_{k=1}^{n} e_k \cdot S_{jk} - e_{доп} \cdot S_{j\,доп})^2 \to min$$

Обмеження: $\begin{cases} e_{доп} = \varepsilon \cdot e_{корисна} \\ e_k > 0, \quad k = 1 \ldots n \end{cases}$

З урахуванням знайдених оцінок коефіцієнтів моделі (на прикладі 1 півріччя 2009 року):

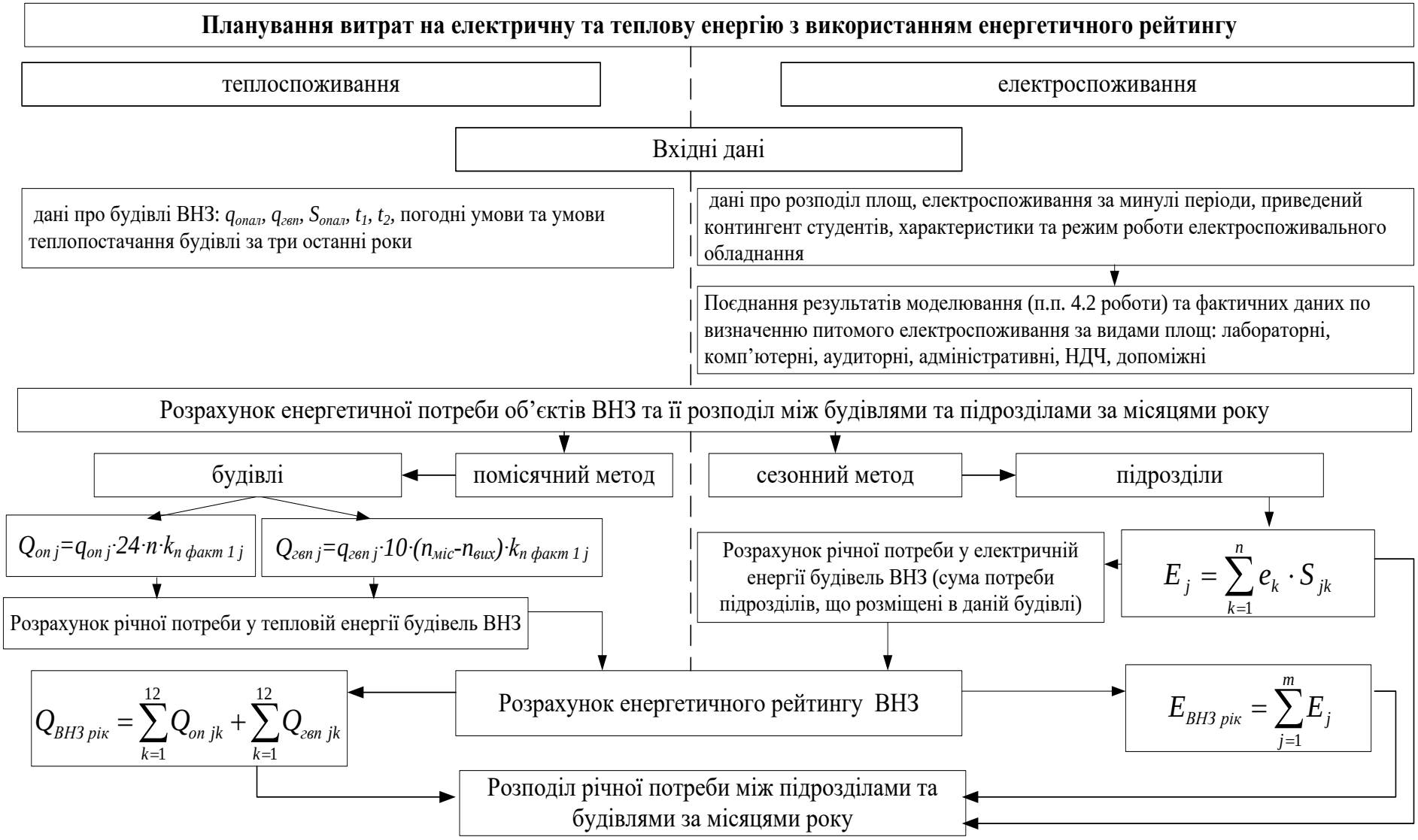
$$E_j = 21{,}55 \cdot S_{j1} + 10{,}97 \cdot S_{j2} + 5{,}77 \cdot S_{j3} + 16{,}11 \cdot S_{j4} + 47{,}8 \cdot S_{j5} + 1{,}06 \cdot S_{j\,доп} + 21{,}55 \cdot 1{,}72 \cdot \Delta S_{j1},$$

Крок 5. Перевірка адекватності моделі

$$R^2 = 0{,}85; R = 0{,}922; F_{експ} = 10{,}41 > F_{табл}(6{,}11, 0{,}05) = 3{,}135; \; t_{емп} = 3{,}23 > t_{табл}(\alpha/2, n-m-1) = 2{,}201$$

Крок 6. Інвентаризація електроспоживального обладнання, розміщеного на *n*-видах площ підрозділів та аналізування відповідності розрахункових питомих величин електроспоживання фактичним.

Використання енергетичного рейтингу при плануванні енергоспоживання комплексу будівель ВНЗ



ІІІ РІВЕНЬ – ЛОКАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ (БУДІВЛЯ)
Особливості вибору економічно доцільного теплового захисту будівлі з різними джерелами теплоти

- Функція інтегральної вартості системи джерело теплоти – огороджувальні конструкції:

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

- Покращення теплового захисту огороджувальних конструкцій будівлі

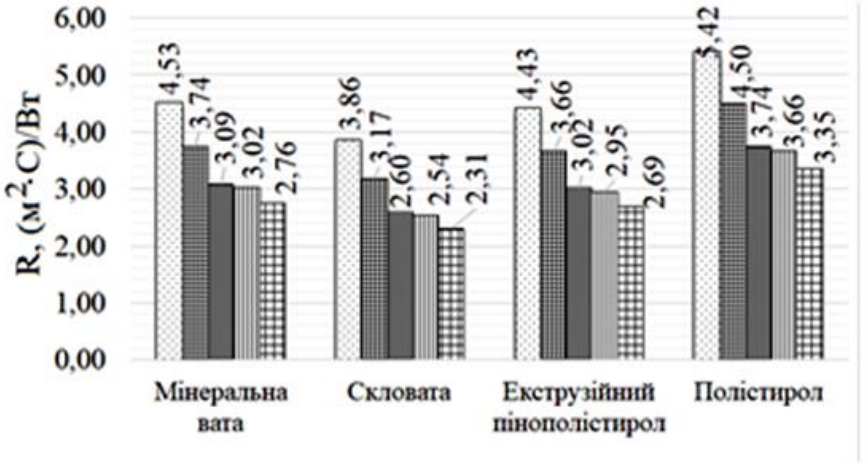
$$I_{із} = \sum_i (A_i + B_i \cdot F_i)\cdot\lambda\cdot R_{із} + \sum_j (A_j + B_j \cdot F_j)\cdot R_j$$

Крім того

1) комплексний вибір здійснюється із врахуванням комфортної температури внутрішнього повітря у приміщенні;

2) вибір того чи іншого варіанту проводиться не тільки за зменшенням споживання енергоносіїв, терміном окупності чи чистою приведеною вартістю.

Порівняння альтернатив здійснюється за енергетичними, економічними показниками.



Оптимальний термічний опір теплоізолюючого матеріалу зовнішньої стіни та відповідні інтегральні витрати

Ексергетичний аналіз. Модель дослідження

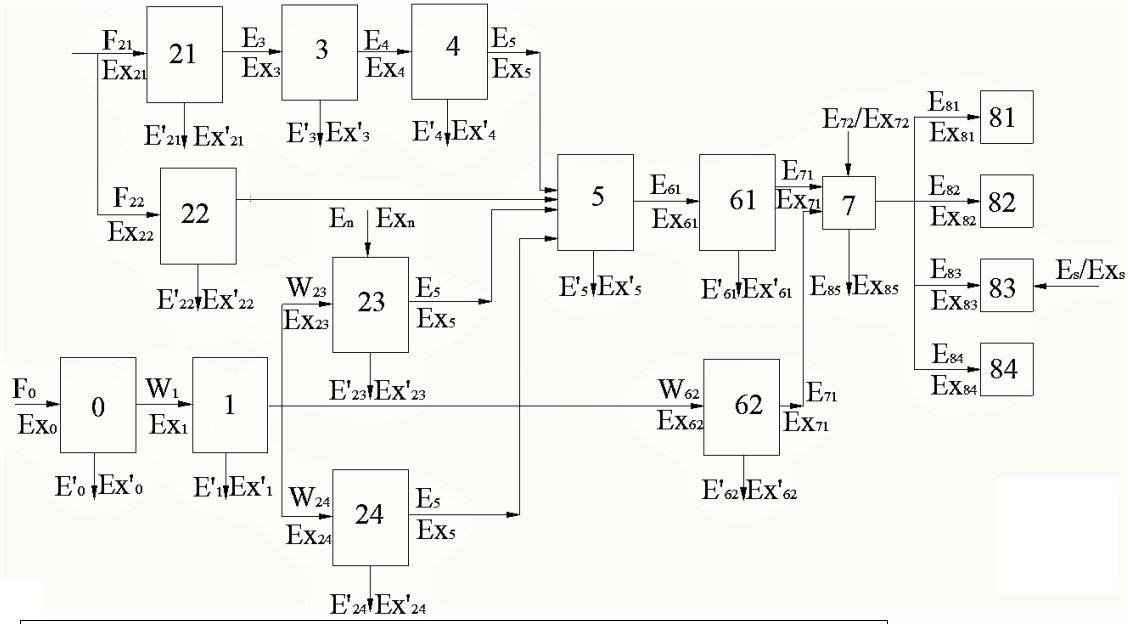
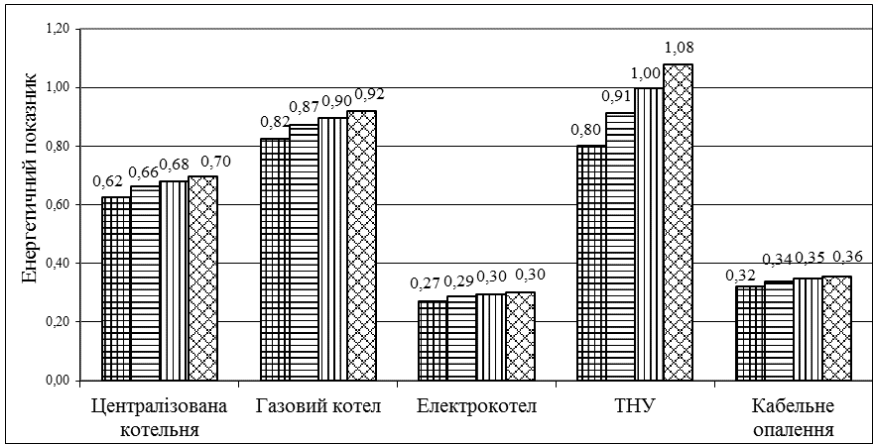
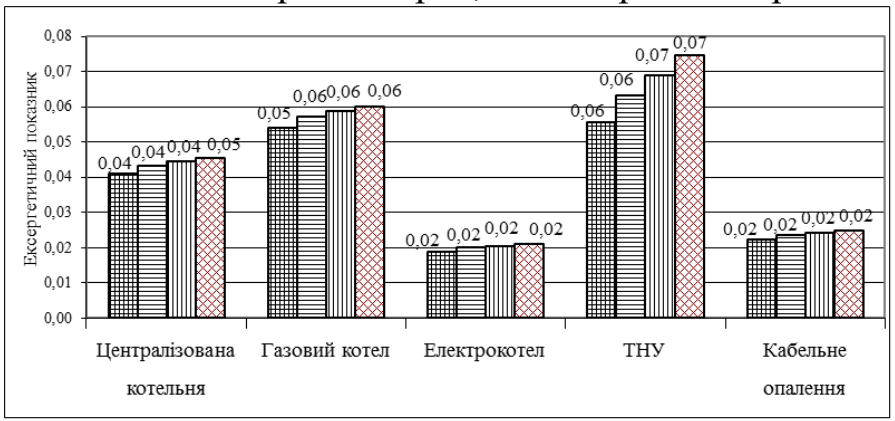


Схема потоків енергії / ексергії для різних джерел теплопостачання будівлі:

0 – електрична станція; 1 – електромережі; 21 – газовий котел централізованого теплопостачання; 22 – газовий котел автономної котельні; 23 – ТНУ; 24 – електричний котел; 3 – теплова мережа; 4 – тепловий пункт; 5 – система опалення; 61 – прилад опалення; 62 – кабелі в огородженнях; 7 – повітря в кімнаті; 81 – зовнішня стіна; 82 – покриття; 83 – вікно; 84 – двері; E – потік енергії; Ex – потік ексергії; W – електрична енергія; E’ – втрати енергії; Ex’ – втрати ексергії



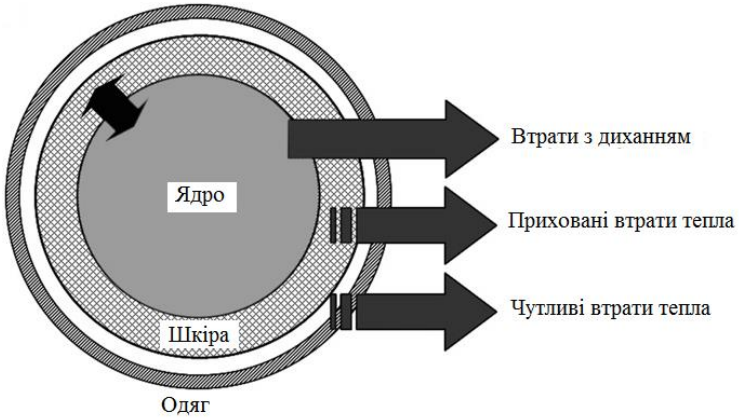


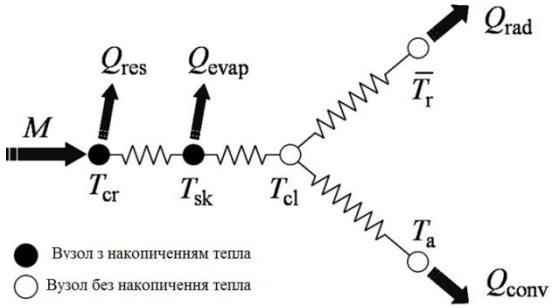
Термічний опір огороджувальних конструкцій

- відповідає нормам 80-х років
- відповідає нормам 90-х років
- відповідає нормам 2006 року
- відповідає сучасним вимогам

$$\eta_T = \frac{Q_{81} + Q_{82} + Q_{83} + Q_{84} + Q_{85}}{F} \qquad \eta_e = \frac{Ex_{81} + Ex_{82} + Ex_{83} + Ex_{84} + Ex_{85}}{Ex_F}$$

Опис ексергетичної моделі людського тіла





Енергетичний баланс для оболонки та ядра:

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

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

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

$$\Sigma_{sk} = t_{sk} - 34{,}1$$

$$\Sigma_{cr} = t_{cr} - 36{,}6$$

На базі цих двох сигналів визначається швидкість руху крові по судинах, та маса секрету шкіри:

$$V_{bl} = \begin{cases} \dfrac{6{,}3 + 75 \cdot \Sigma_{cr}}{1 - 0{,}5 \cdot \Sigma_{sk}}, & якщо\ \Sigma_{cr} < 0 \cap \cup \Sigma_{sk} < 0 \\ 6{,}3 \end{cases}$$

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

Ексергетичний баланс людського тіла:

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

де Ex_m – ексергія тепла, що обумовлена обміном речовин;

$Ex_{gen,cr}$ – ексергія рідини, що генерується в ядрі за рахунок метаболізму;

$Ex_{gen,\mathrm{sk}}$ – 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 повітрю;

$Ex_{exh,air}$ – ексергія вологого повітря, що видихає людина;

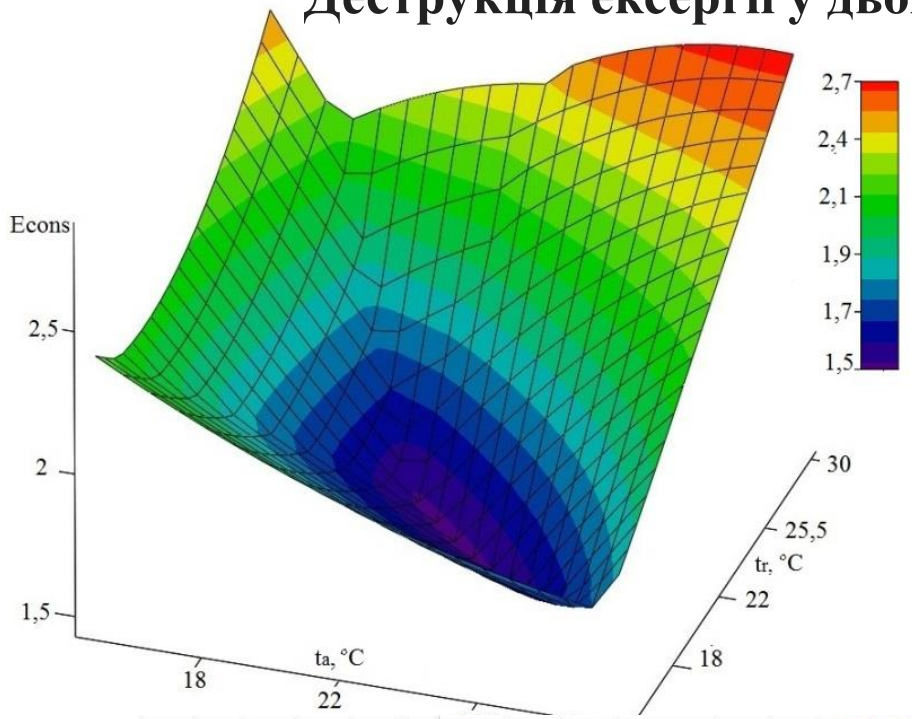
$Ex_{sw,ha}$ – ексергія водяної пари, що появляється за рахунок секрету шкіри;

$Ex_{stored,cr}$ – ексергія, що накопичується в ядрі;

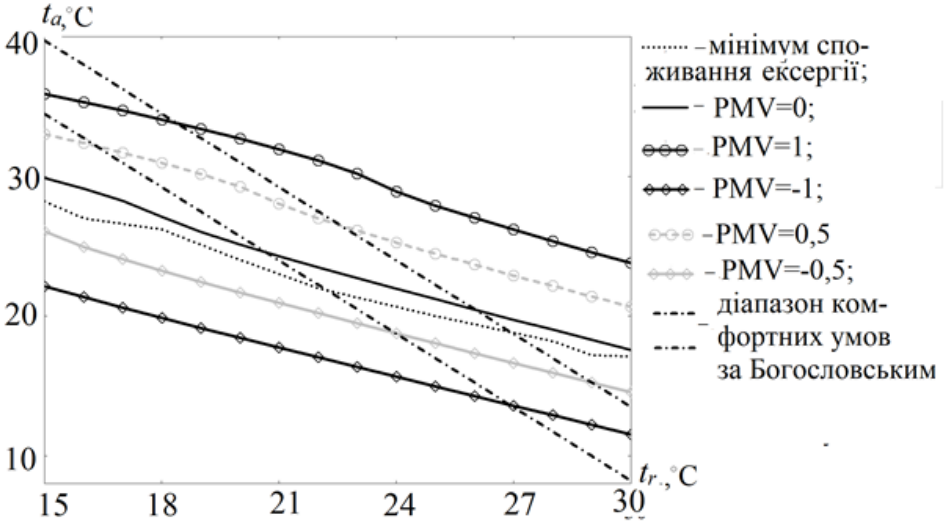
$Ex_{stored,\mathrm{sk}}$ – ексергія, що накопичується в оболонці;

Ex_{cons} – ексрегія, що споживається людським тілом.

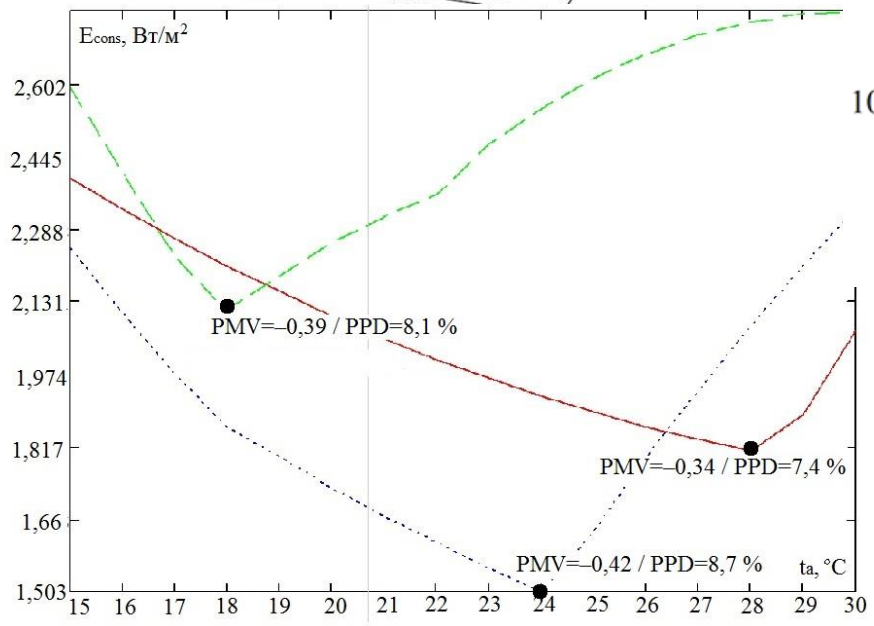
Деструкція ексергії у двовузловій системі людина



Графік залежності споживання ексергії людським тілом E_{cons} від температури повітря у кімнаті t_a, для різних значень середньої радіаційної температури t_r



Залежність середньої радіаційної температури t_r повітря від температури повітря у кімнаті t_a для моделей теплового комфорту



– для t_r=15 °C;
– для t_r=28 °C;
– для t_r=20 °C;
– мінімум споживання ексергії

Чисельний експеримент

Для отримання регресійної моделі проведено чисельний експеримент типу p^k, де число факторів k=5, число рівнів p=2, число дослідів $N=2^5=32$

Варіювання факторів

Фактор	Енергетичний аналіз / Ексергетичний аналіз			
	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	-1	0	1	1
t_r , X_1	15	22,5	30	7,5
PMV/t_0, X_2	263	273	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

Матриця планування експерименту

№	t_r	$PMV\ (T_0)$	M	I_{clo}	φ
1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1	-1
4	1	1	-1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	-1
7	-1	1	1	-1	-1
8	1	1	1	-1	-1
32	1	1	1	1	1

Для комфортної температури відповідно до **енергетичної моделі** теплового комфорту людини регресійна модель має вигляд:

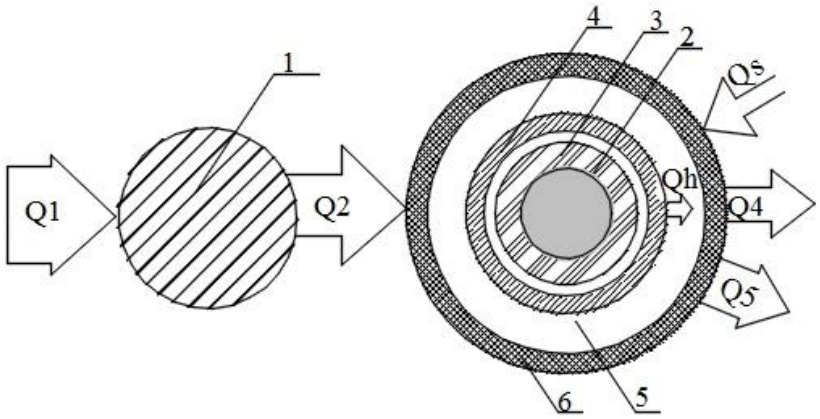
$$t_{comf} = -5,81 \cdot \bar{X}_1 + 6,4 \cdot \bar{X}_2 - 2,53 \cdot \bar{X}_3 - 4,96 \cdot \bar{X}_4 - 0,48 \cdot \bar{X}_5 + 23,68$$

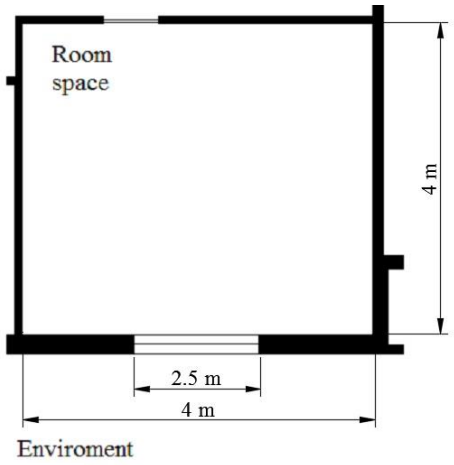
Для PMV=0 $$t_{comf} = -6,01 \cdot \bar{X}_1 - 2,51 \cdot \bar{X}_3 - 4,96 \cdot \bar{X}_4 - 0,42 \cdot \bar{X}_5 + 23,82$$

Для **ексергетичної моделі** теплового комфорту:

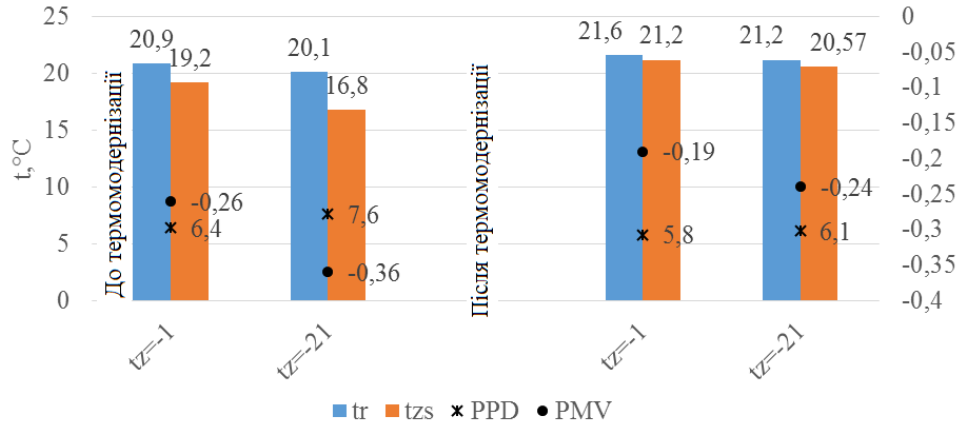
$$t_{comf} = -4,58 \cdot \bar{X}_1 - 0,57 \cdot \bar{X}_2 - 4,43 \cdot \bar{X}_3 - 5,92 \cdot \bar{X}_4 - 0,397 \cdot \bar{X}_5 + 21,44$$

Система джерело теплоти – людина – огороджувальні конструкції

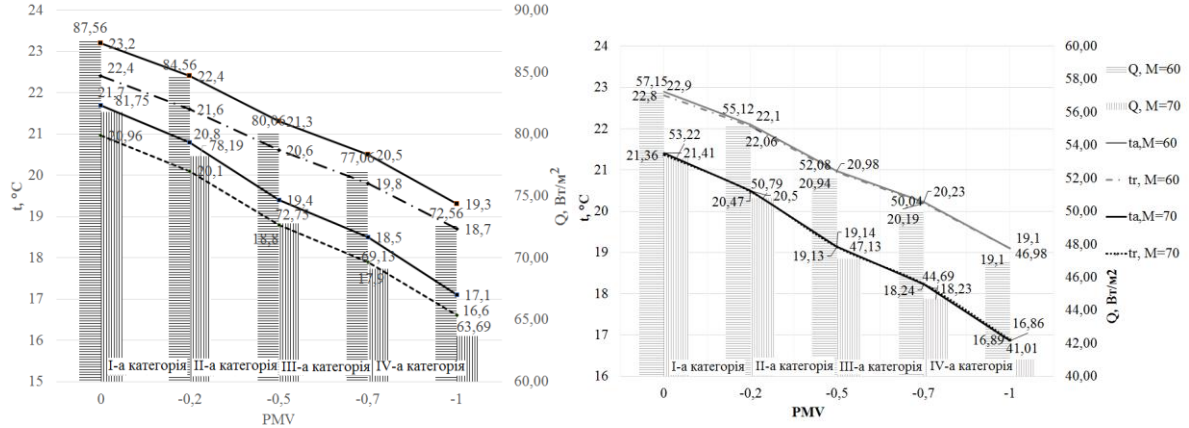




1 – генерація; 2 – ядро; 3 – оболонка; 4 – одяг; 5 – повітря в кімнаті; 6 – огородження будівлі; Q1 – енергія первинного палива; Q2 – кількість теплоти, що надходить у будівлю, Qh – надходження теплоти від людини, Qs –теплонадходження від сонця; Q3 – інші тепло надходження; Q4 – кількість теплоти, що втрачається через огороджувальні конструкції; Q5 – втрати тепла на вентиляцію

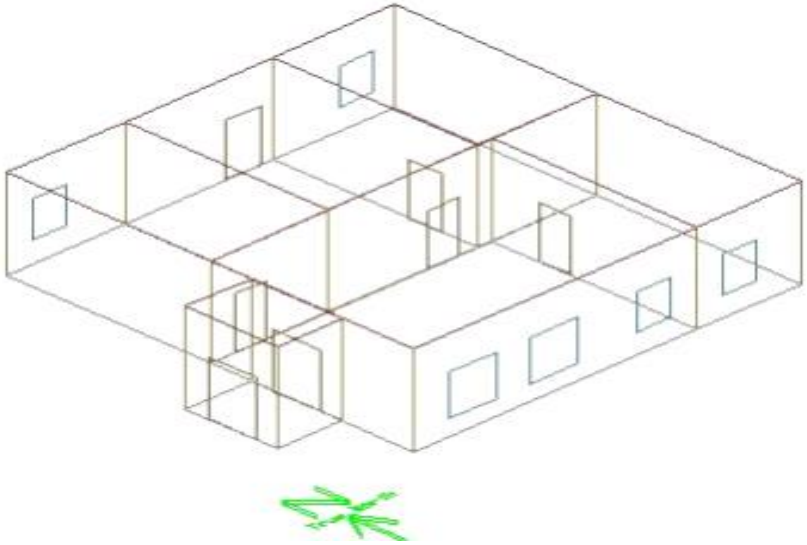


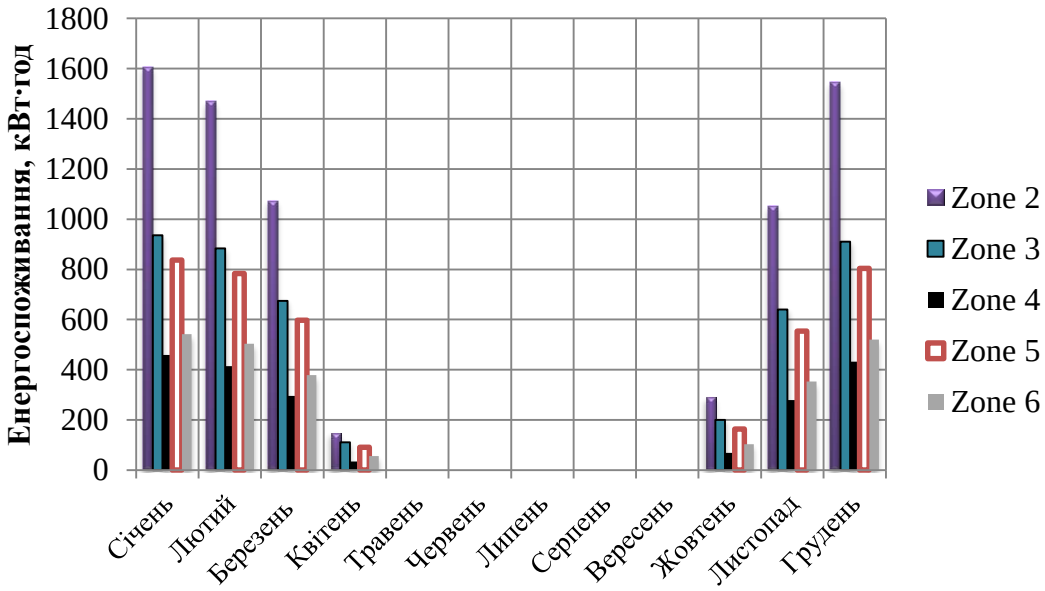
Зміна середньої радіаційної температури та рівня забезпечення комфортних умов при термомодернізації

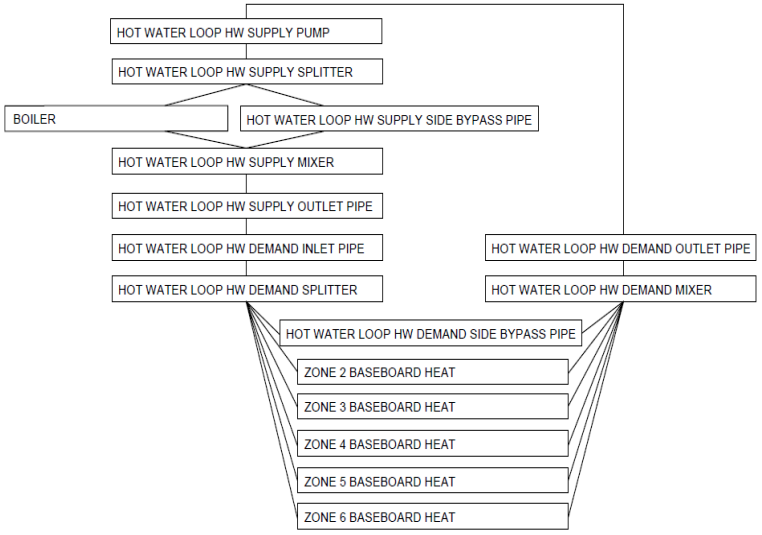


Залежність потреби на опалення від категорії будівлі щодо забезпечення комфортних умов:
а) до термомодернізації; б) після термомодернізації

Динамічне моделювання теплового стану будівлі

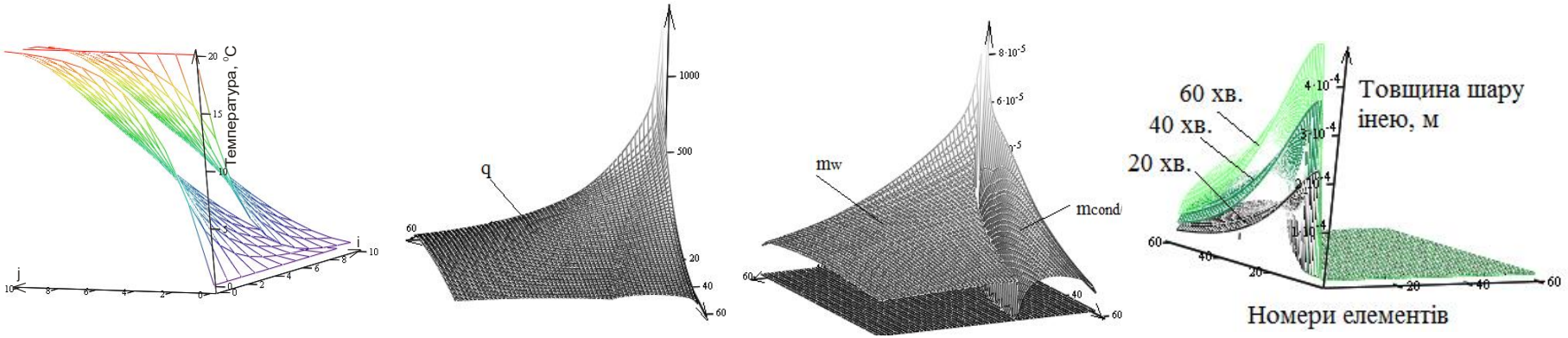




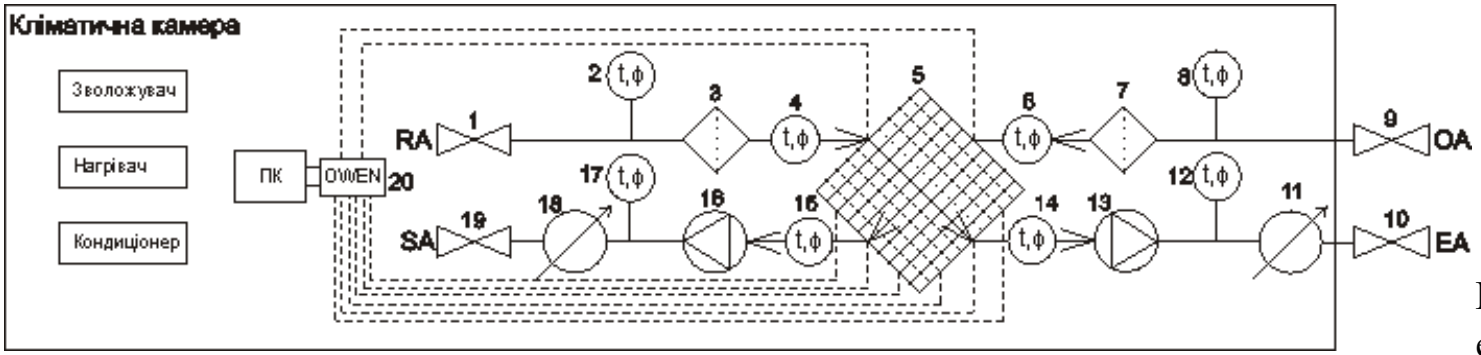


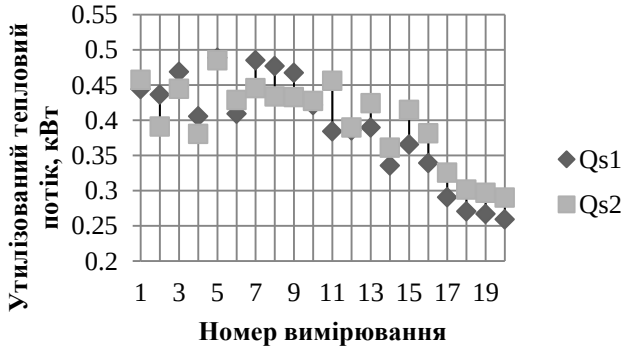
Зображення енергетичної моделі будівлі та її інженерних мереж, результати моделювання

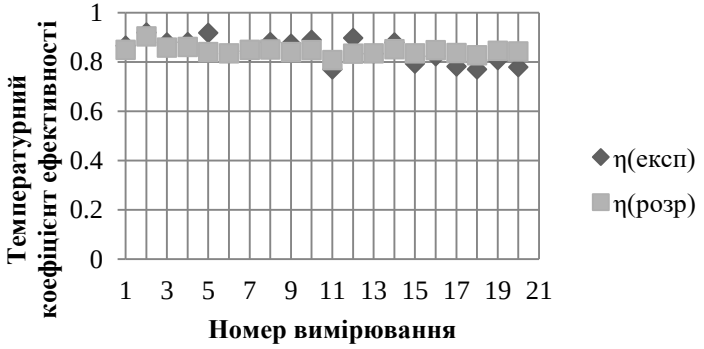
Моделювання/експериментальне дослідження системи вентиляції з мембранним теплоутилізатором



Результати моделювання перехресноплинного теплообмінника в системі вентиляції: розподіл температур, теплового потоку, зображення процесів масообміну та конденсації/утворення інею

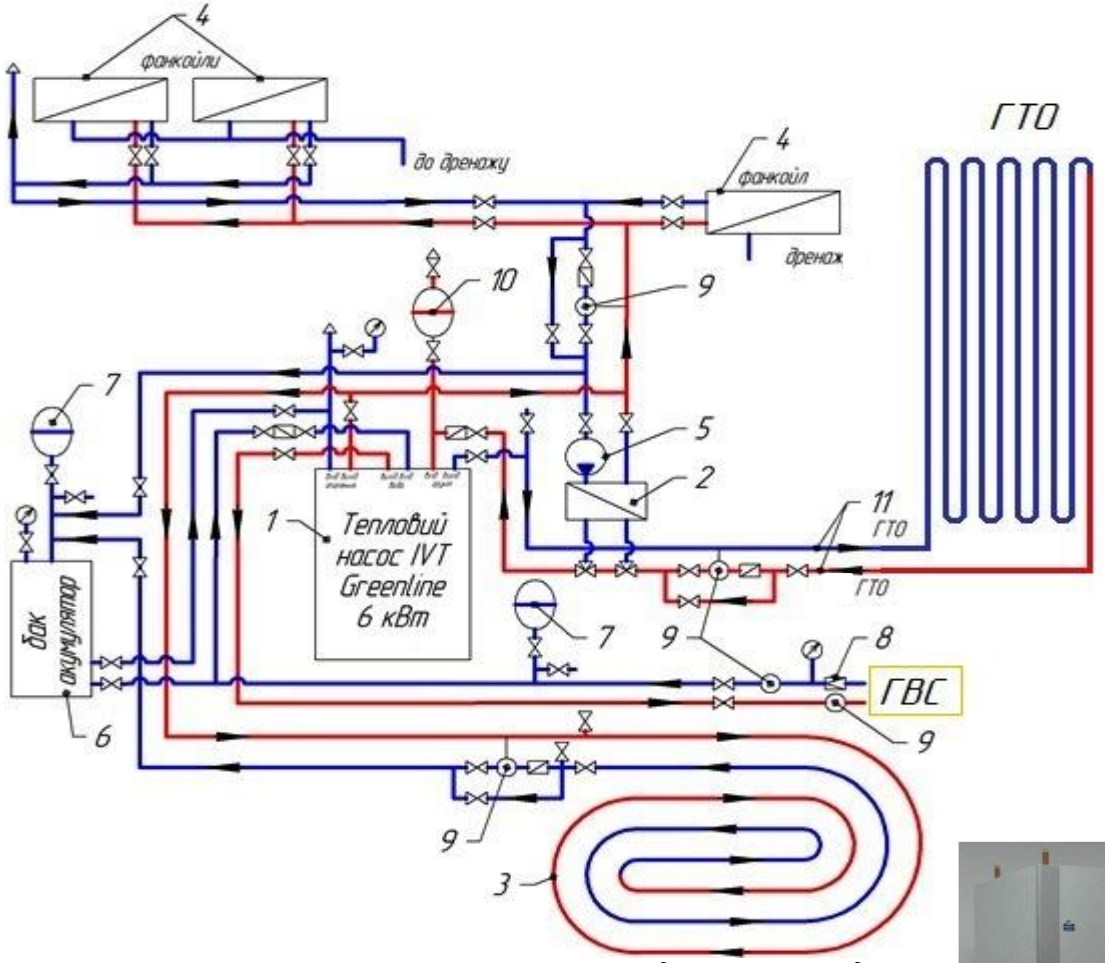




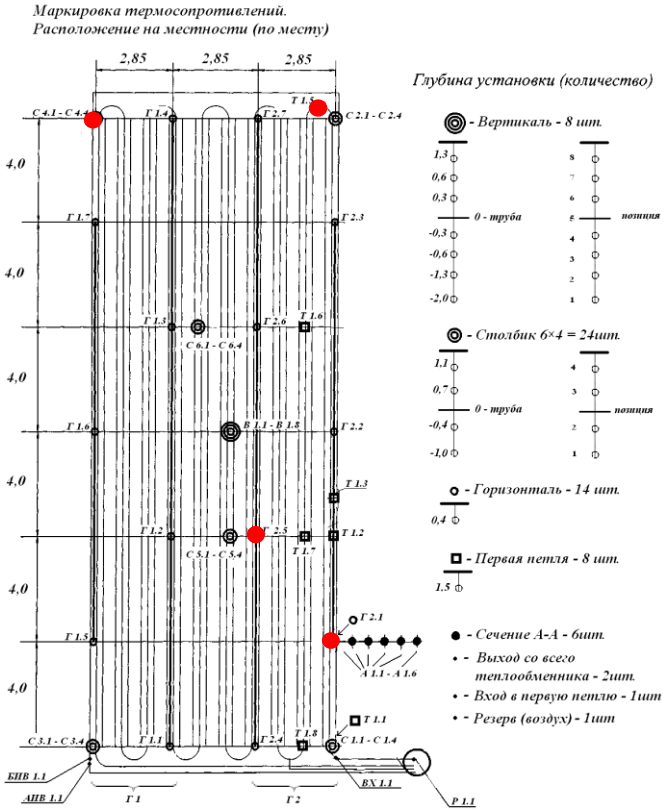


Результати експериментального дослідження: Утилізований тепловий потік та коефіцієнти ефективності теплоутилізатора

Система теплопостачання на основі теплового насоса «ґрунт-вода» та ґрунтового колектора

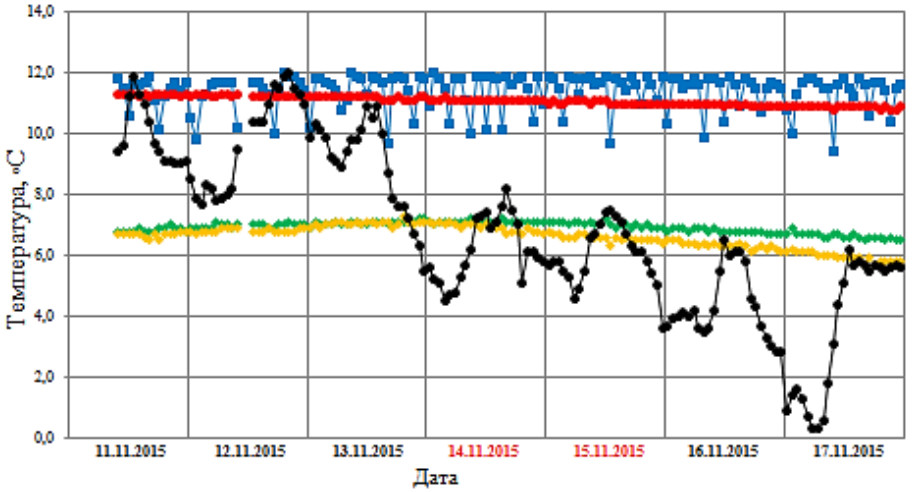


водяна тепла підлога

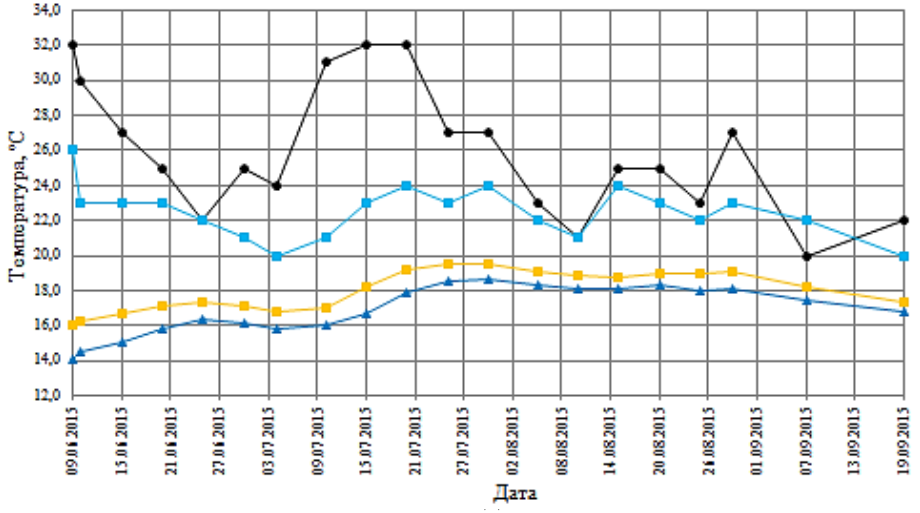


1 - тепловий насос; 2 - пластинчастий теплообмінник; 3 - система опалення типу водяна тепла підлога; 4 - система повітряного опалення (кондиціонування) на основі фенкойлів; 5 - циркуляційний насос; 6 - бак-акумулятор; 7 – розширювальний мембранний бак; 8 - редуктор тиску холодної води; 9 - лічильники; 10 - розширювальна ємність ґрунтового колектора; 11 - контур ґрунтового колектора.

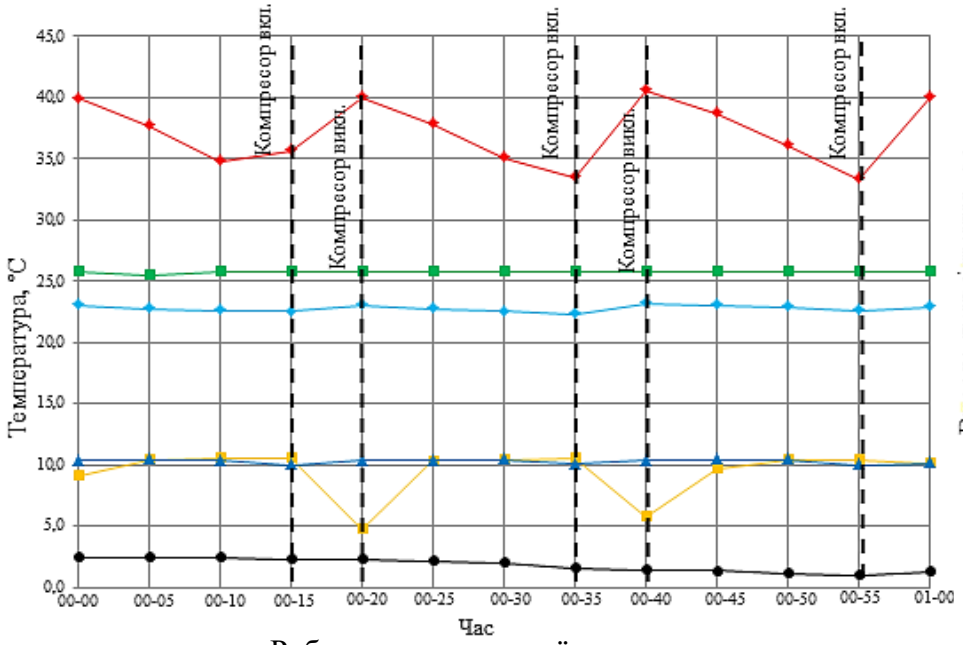
Результати експериментальних досліджень



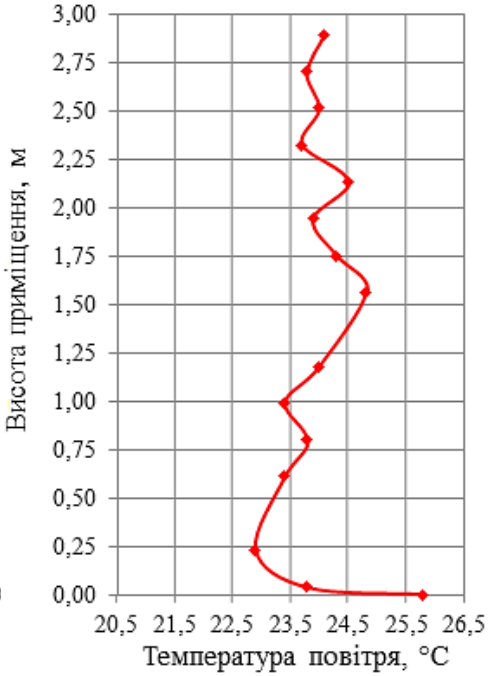
Дослідження температури ґрунту



Відновлення теплового стану ґрунтового колектора



Робота теплонасосної установки

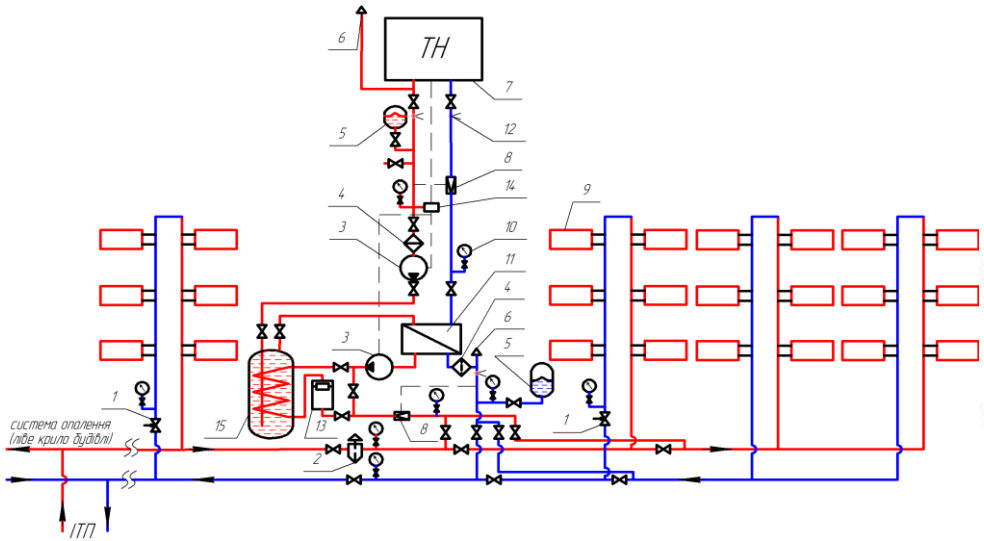


Дослідження тепло-вологісного стану приміщення

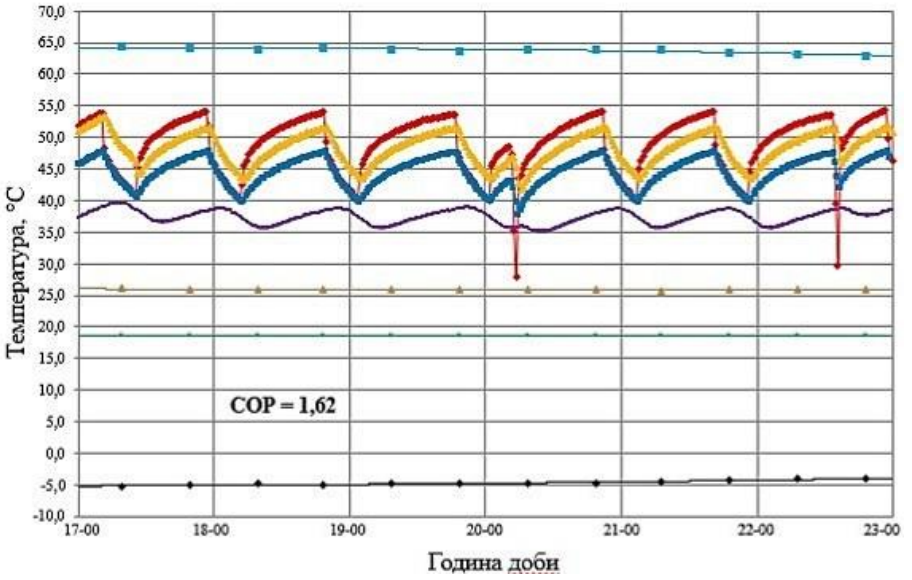
Середній за опалювальний період, коефіцієнт перетворення енергії теплового насоса склав: **COP = 3,34.**

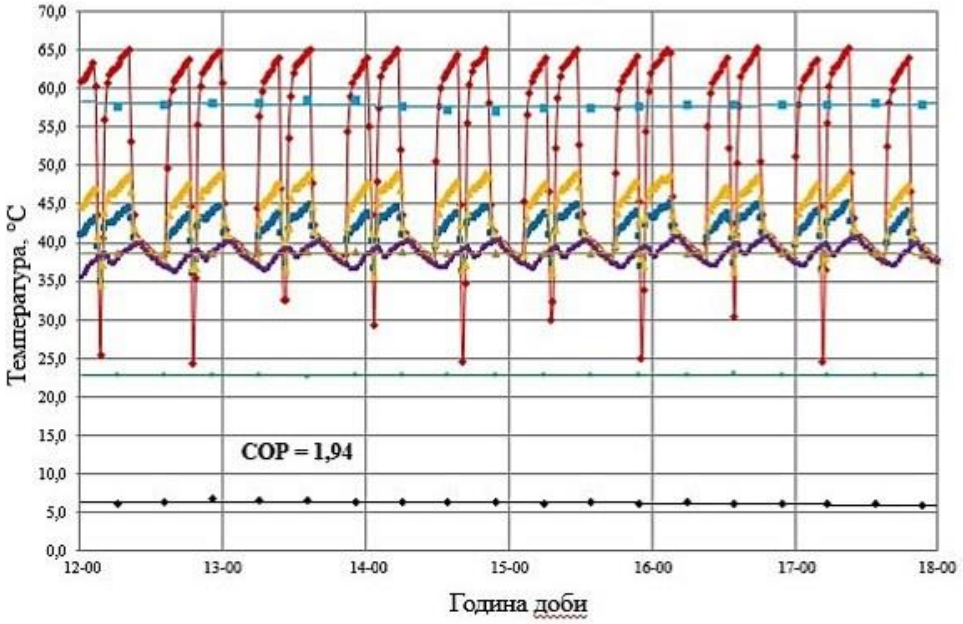
В літній період акумулюється **7,26 МДж** теплової енергії.

Система теплопостачання на основі теплового насоса «повітря-вода»



1 – клапани балансувальні; 2 – барботажний сепаратор; 3 – насоси циркуляційні; 4 – фільтри сітчасті; 5 – баки розширювальні мембранні; 6 – повітряспускники; 7 – тепловий насос «повітря-вода» (ТН); 8 – лічильник теплоти; 9 – радіатор системи опалення; 10 – манометр; 11 - пластинчатий теплообмінник, 12 – датчики температури; 13 – електричний котел; 14 – датчик тиску, 15 – бак-акумулятор; ІТП – індивідуальний тепловий пункт.





місяць	жовтень	листопад	грудень	січень	лютий	березень	квітень
Середньомісячна температура в м Києві, °С	7,9	1,8	-2,0	-4,3	-3,3	1,3	8,9
Вихідна потужність теплового насосу, кВт	15	13	11,5	11	11,3	12,8	15,5
Середні питомі тепловтрати будівлі, кВт	65	80	100	110	107	97	65
Можлива економія теплової енергії, %	23	16	11	10	10	13	24

Середня, за опалювальний період, економія теплової енергії при експлуатації теплонасосної системи теплопостачання склала **15%.**

Середній за опалювальний період, коефіцієнт перетворення енергії теплового насоса склав: **COP = 1,82.**

ВИСНОВКИ

Авторами розвинуто методологічні аспекти енергоаудиту будівель на прикладі об'єктів закладів освіти, враховуючи їх особливості; вдосконалено існуючі та розроблені інноваційні підходи енергоменеджменту; створено систему оптимізації та управління процесами енергоспоживання та енергозбереження закладів освіти; запропоновано методику оптимального вибору джерела теплоти в поєднанні із різноваріантними огороджувальними конструкціями будівлі на основі критерію інтегральної вартості; створено динамічні моделі теплового стану будівлі; досліджено ефективність систем вентиляції повітря з теплорекуперацією та відновленням нормативної вологості; розглянуто можливість та доцільність інтеграції теплонасосних технологій у існуючу систему опалення адміністративної будівлі.

Економічний та соціальний ефект, що мають та будуть мати результати роботи. Запровадження ефективної багаторівневої системи енергоменеджменту в галузях, що включають в себе об'єкти соціальної сфери, такі як дитячі садочки, школи, лікарні, навчальні заклади тощо, забезпечить не тільки економію коштів державного бюджету, а і призведе до підвищення рівня теплового комфорту користувачів будівель, що буде мати значний соціальний ефект. Динамічне моделювання теплового стану будівель дозволить оптимізувати переривчасті режими роботи системи опалення, що в свою чергу дозволить заощаджувати до 10% теплової енергії на потреби опалення. Комплексний аналіз системи джерело теплової енергії – огороджувальні конструкції – людина дозволяє ще на етапі проектування приймати оптимальні рішення, що призведуть до значного економічного ефекту протягом всього життєвого циклу будівлі.

Результати роботи **впроваджені** в нормативно-практичні документи: «Методика енергетичного аудиту закладів освіти. Загальні положення»; «Типове положення про запровадження енергетичного менеджменту в галузі освіти»; «Програма з енергоефективності НТУУ «КПІ» на 2012 - 2015 рр.», при підготовці ДСТУ-Н Б А.2.2-13:2015 «Енергоефективність будівель. Настанова щодо застосування методу проведення енергетичної оцінки та енергетичної сертифікації будівель». Практичну цінність підтверджено відповідними актами впровадження.