

# ЕНЕРГО- І ЕКСЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ БУДІВЛІ (ДОСЛІДЖЕННЯ, АНАЛІЗ, НОВІ ПОКАЗНИКИ)

---

## Вступ

На опалення, освітлення та охолодження будівель витрачається біля 1/3 первинних енергоресурсів, що споживаються в світі [1]. Тому і питання ефективного використання енергії в будівлях є дуже актуальним. В Україні для оцінки енергоефективності будівель застосовується енергетичний підхід, що полягає у визначенні питомого енергоспоживання за опалювальний період: при порівнянні з нормативним значенням визначається клас енергоефективності будівель [2]. Це не дає можливості оцінити ефективність використання первинного палива. За кордоном для підвищення розуміння якості енергетичних потоків в будівлі використовують також ексергетичну методичку [1]. Сьогодні говорять про появу та існування будинків із низьким споживанням ексергії (Low exergy building), головною характеристикою яких є свідоме проектування із зменшенням внутрішніх і зовнішніх навантажень [1]. Особлива увага в таких будинках приділяється параметрам комфорту.

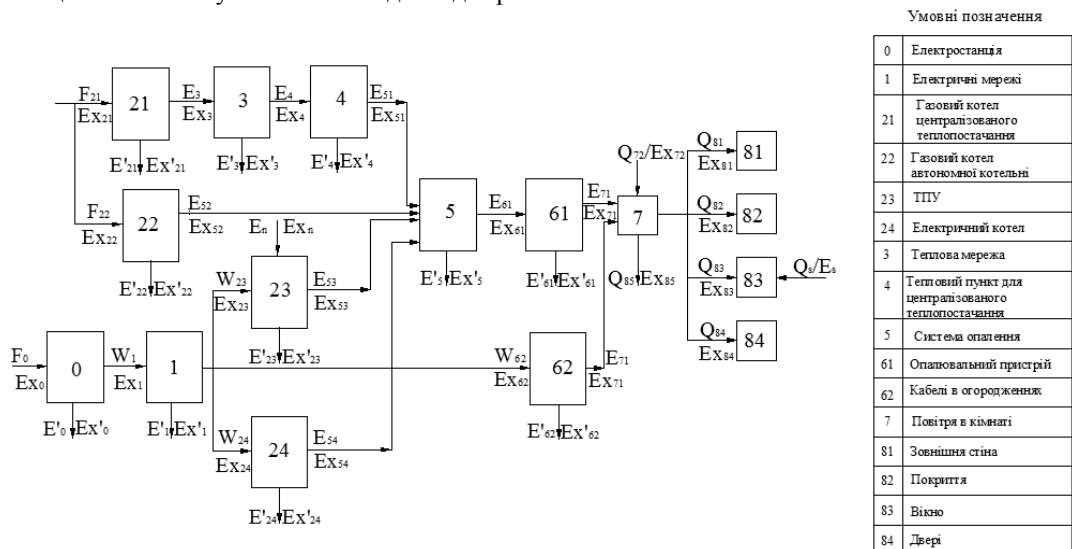
На теренах нашої країни ексергетичний підхід розвивається для оцінки теплоенергетичного обладнання [3]. Існує думка [4], що ексергія як фактор роботоздатності потоку не може використовуватися при формуванні макроенергетичного критерію енергоефективності будівлі (запропонований автором критерій оцінює ефект експлуатації). З існуючими тенденціями використання в будівлі різних за якістю джерел теплоти та розвитком низькотемпературних концепцій опалення застосування ексергетичного та енергетичного аналізу дають більш повне розуміння при оптимізації системи «будівля – джерело опалення». Використання ексергетичного підходу дозволяє враховувати взаємозв'язки енергій різної фізичної природи та дисипативні втрати потужності. Проведений [5] аналіз потоків та втрат енергії та ексергії в різних компонентах системи «будівля – джерело опалення (теплова помпова установка - ТПУ)» показує доцільність комплексного застосування енергетичного та ексергетичного аналізу. Крім того, при дослідженні будівель варто оцінювати енерго- та ексергоефективність використання різних первинних джерел енергії.

**Постановка задачі.** Метою статті є: а) дослідження та аналіз енергетичних та ексергетичних потоків, які використовуються для забезпечення теплопостачання будівлі, починаючи від первинного палива і закінчуючи огорожувальними конструкціями; б) оцінка існуючих показників енергоефективності будівлі; в) розробка нових показників, що визначають енерго- і ексергоефективність використання первинного палива, та обґрунтування доцільності їх застосування.

**Методика дослідження.** Для того, щоб проаналізувати загальні втрати енергії/ексергії вздовж усього ланцюга теплопостачання, оберемо об'єктом дослідження енергопостачання приміщення розмірами 4×4 м<sup>2</sup> як елемент будівлі, спорудженої у 80-х роках у м. Києві. Схема потоків енергії/ексергії для різних джерел тепла будівлі (централізована котельня, газовий котел, електричний котел, кабельне опалення та ТПУ) показана на рис.1. Умовні позначення до рис.1 наведені в таблиці 1.

**Потоки енергії/ексергії для ланцюга «виробництво – споживання теплової енергії»**

Потік енергії/ексергії для ланцюга «виробництво – споживання теплової енергії» визначаємо за опалювальний період за умови середньої температури навколишнього середовища за цей період. Розрахунки потоків енергії та ексергії проводимо для двох варіантів огорожувальних конструкцій: перший варіант відповідає нормам 80-х років, другий – сучасним вимогам [2]. Комбіноване теплопостачання не розглядається, вважається, що необхідний мікроклімат в приміщенні забезпечується тільки одним джерелом тепла.



Умовні позначення

0	Електростанція
1	Електричні мережі
21	Газовий котел централізованого теплопостачання
22	Газовий котел автономної котельні
23	ТПУ
24	Електричний котел
3	Теплова мережа
4	Тепловий пункт для централізованого теплопостачання
5	Система опалення
61	Опалювальний пристрій
62	Кабелі в огороженнях
7	Повітря в кімнаті
81	Зовнішня стіна
82	Покриття
83	Вікно
84	Двері

Рис.1. Схема потоків енергії/ексергії для різних джерел тепла будівлі

Таблиця 1

**Позначення надходжень та втрат енергії/ексергії в різних елементах системи**

Надходження енергії / ексергії до	Втрати енергії / ексергії в
1	2
$F_0 / Ex_0$ електростанції	$E'_0 / Ex'_0$ електростанції
$W_1 / Ex_1$ електричних мереж	$E'_1 / Ex'_1$ електричних мережах
$F_{21} / Ex_{21}$ котла централізованого теплопостачання	$E'_{21} / Ex'_{21}$ котлі централізованого теплопостачання
$F_{22} / Ex_{22}$ газового котла автономної котельні;	$E'_{22} / Ex'_{22}$ газовому котлі автономної котельні
$W_{24} / Ex_{24}$ - електричного котла;	$E'_{24} / Ex'_{24}$ - електричному котлі
$W_{23} / Ex_{23}$ - теплової помпової установки	$E'_{23} / Ex'_{23}$ - теплової помпової установці
$E_n / Ex_n$ - теплової помпи, низькопотенційне тепло	
$E_3 / Ex_3$ - теплової мережі	$E'_3 / Ex'_3$ - теплової мережі

Продовження таблиці 1

1	2
$E_4 / Ex_4$ - теплового пункту	$E'_4 / Ex'_4$ - теплового пункті
$E_{51} / Ex_{51}$ - системи опалення від централізованого теплопостачання; $E_{52} / Ex_{52}$ - системи опалення від газового котла; $E_{53} / Ex_{53}$ - системи опалення від ТПУ; $E_{54} / Ex_{54}$ системи опалення від електричного котла	$E'_{51} / Ex'_{51}$ - системі опалення
$E_{61} / Ex_{61}$ - приладу опалення	$E'_{61} / Ex'_{61}$ - опалювальному пристрої
$W_{62} / Ex_{62}$ - кабелів в огороженнях	$E'_{62} / Ex'_{62}$ - кабелях в огороженнях
$E_{71} / Ex_{71}$ - повітря в кімнаті від системи опалення	$Q_{81} / Ex_{81}$ - зовнішній стіні
$E_{72} / Ex_{72}$ - повітря в кімнаті від побутових приладів	$Q_{82} / Ex_{82}$ - покритті
$Q_s / E_s$ - повітря в кімнаті від сонячного випромінювання	$Q_{83} / Ex_{83}$ - вікні
	$Q_{84} / Ex_{84}$ - дверях
	$Q_{85} / Ex_{85}$ - у вентиляційній системі

Втрати енергії через огорожувальні конструкції і вентиляцію та надходження енергії від сонячного випромінювання та побутових приладів визначаються за методикою, наведеною у стандарті [2], їх можна також розраховувати на основі іноземного досвіду [5]. Витрати електроенергії на роботу живильних та циркуляційних pomp не враховуються.

Приклад розрахунку надходжень та втрат енергії/ексергії в системі «будівля – джерело опалення» для різних джерел тепла наведено в таблицях 2 – 6. У цих таблицях потоки ексергії визначаються на основі даних про енергетичні потоки наступним чином [4]:

1) ексергія потоку теплоти:

$$Ex_Q = Q \cdot \tau_e, \quad (1)$$

де  $Q$  – енергія теплового потоку;

$\tau_{ei}$  - ексергетична температурна функція, яка для  $i$ -го потоку дорівнює:

$$\tau_{ei} = \frac{T_i - T_{oc}}{T_i}, \quad (2)$$

$T_i$  - температура теплового потоку;

$T_{oc}$  – температура навколишнього середовища, приймаємо сталою і рівною середній за опалювальний період [6];

2) ексергія електричної енергії:

$$Ex_w = W;$$

3) ексергія палива:

$$Ex_p = Q_p \cdot \frac{Q_p^g}{Q_p^h},$$

де  $Q_p$  – кількість теплоти, що виділяється при згорянні первинного палива;

$Q_p^g$  – вища теплота згорання палива;

$Q_p^h$  – нижча теплота згорання палива [7].

Таблиця 2

## Потоки та втрати енергії/ексергії для централізованого теплопостачання з газовим котлом

Потоки та втрати енергії	Потоки та втрати ексергії
$F_{21} = E'_{21} + E_3$ , де $E'_{21} = F_{21}(1 - \eta_{21})$	$Ex_{21} = Ex'_{21} + Ex_3$ , де $Ex_{21} = F_{21} \frac{Q_p^g}{Q_p^h}$
$E_3 = E'_3 + E_4$ , де $E'_3 = E_3(1 - \eta_3)$	$Ex_3 = Ex'_3 + Ex_4$ , де $Ex_3 = E_3(1 - \frac{T_{oc}}{T_3})$
$E_4 = E'_4 + E_5$ , де $E'_4 = E_4(1 - \eta_4)$	$Ex_4 = Ex'_4 + Ex_5$ , де $Ex_4 = E_4(1 - \frac{T_{oc}}{T_4})$
$E_5 = E'_5 + E_{61}$ , де $E'_5 = E_5(1 - \eta_5)$	$Ex_5 = Ex'_5 + Ex_{61}$ , де $Ex_5 = E_5(1 - \frac{T_{oc}}{T_4})$
$E_{61} = E'_{61} + E_{71}$ , де $E'_{61} = E_{61}(1 - \eta_{61})$	$Ex_{61} = Ex'_{61} + Ex_{71}$ , де $Ex_6 = E_6(1 - \frac{T_{oc}}{T_4})$
$E_{71} = Q_{81} + Q_{82} + Q_{83} + Q_{84} + Q_{85} - Q_s - Q_{72}$	$Ex_{71} = Ex_{81} + Ex_{82} + Ex_{83} + Ex_{84} + Ex_{85} - Ex_s - Ex_{72}$ , де $Ex_{71} = E_{71} \cdot (1 - \frac{T_{oc}}{T_p})$

де  $\eta_{21} = 0,85$  – енергетична ефективність газового котла централізованого теплопостачання [8];

$\eta_3 = 0,8$  – ефективність передачі енергії тепловими мережами;

$\eta_4 = 0,9$  – енергетична ефективність теплового пункту;

$\eta_5 = 0,95$  – енергетична ефективність системи опалення;

$\eta_{61} = 0,9$  – енергетична ефективність приладу опалення;

$T_3$  – середня температура теплових мереж, визначається за рівнянням:

$$T_3 = \frac{T'_3 + T''_3}{2},$$

де  $T'_3$  – температура в прямому (або подавальному) трубопроводі теплових мереж,  $K$ ;

$T''_3$  – температура в зворотному трубопроводі теплових мереж,  $K$ .

Вважаємо, що температури теплоносія на вході та виході прямого та зворотного трубопроводів є сталими.

$T_4$  – середня температура в системі опалення, визначається так:

$$T_4 = \frac{T'_4 + T''_4}{2},$$

де  $T'_4$  – температура в прямому (або подавальному) трубопроводі системи опалення,  $K$ ;

$T''_4$  – температура в зворотному трубопроводі системи опалення,  $K$ .

Температури визначаємо за графіком навантаження для теплових мереж [9]:

для середньої температури за опалювальний період  $T'_3 = 358 K$ ,

$$T''_3 = 320,6 K,$$

$$T'_4 = 332,5 K.$$

$T_p$  – температура повітря в кімнаті, згідно із нормами становить  $293 K$  [2].

Таблиця 3

## Потоки та втрати енергії/ексергії для теплопостачання з газовим котлом автономної котельні

Потоки та втрати енергії	Потоки та втрати ексергії
$F_{22} = E'_{22} + E_5$ , де $E'_{22} = F_{22}(1 - \eta_{22})$	$Ex_{22} = Ex'_{22} + Ex_5$ , де $Ex_{22} = F_{22} \frac{Q_p^g}{Q_p^h}$
$E_5 = E'_5 + E_{61}$ , де $E'_5 = E_5(1 - \eta_5)$	$Ex_5 = Ex'_5 + Ex_{61}$ , де $Ex_5 = E_5(1 - \frac{T_{oc}}{T_4})$

$\eta_{22} = 0,85$  – енергетична ефективність газового котла автономної котельні.

Таблиця 4

## Потоки та втрати енергії/ексергії для автономного теплопостачання з електричним котлом

Потоки та втрати енергії	Потоки та втрати ексергії
$F_0 = E'_0 + W_1$ , де $E'_0 = F_0(1 - \eta_0)$	$Ex_0 = Ex'_0 + Ex_1$ , де $Ex_0 = F_0 \frac{Q_p^e}{Q_p^h}$
$W_1 = E'_1 + W_{24}$ , де $E'_1 = W_1(1 - \eta_1)$	$Ex_1 = Ex'_1 + E_{24}$ , де $Ex_1 = W_1$
$W_{24} = E'_{24} + E_5$ , де $E'_{24} = W_{24}(1 - \eta_{24})$	$Ex_{24} = Ex'_{24} + Ex_5$ , де $Ex_{24} = W_{24}$

$\eta_0 = 0,35$  – енергетична ефективність електричної станції;  $\eta_1 = 0,82$  – ефективність передачі енергії електричними мережами;  $\eta_{24} = 0,97$  – енергетична ефективність електричного котла.

Таблиця 5

## Потоки та втрати енергії/ексергії для теплопостачання від кабельної системи

Потоки та втрати енергії	Потоки та втрати ексергії
$F_0 = E'_0 + W_1$ , де $E'_0 = F_0(1 - \eta_0)$	$Ex_0 = Ex'_0 + Ex_1$ , де $Ex_0 = F_0 \frac{Q_p^e}{Q_p^h}$
$W_1 = E'_1 + W_{62}$ , де $E'_1 = W_1(1 - \eta_1)$	$Ex_1 = Ex'_1 + W_{62}$ , де $Ex_1 = W_1$
$W_{62} = E'_{62} + E_{71}$ , де $E'_{62} = W_{62}(1 - \eta_{62})$	$Ex_{62} = Ex'_{62} + Ex_{71}$ , де $Ex_{62} = W_{62}$

$\eta_{62} = 0,99$  – енергетична ефективність кабельної системи опалення.

Таблиця 6

## Потоки та втрати енергії/ексергії для теплопостачання від ТПУ

Потоки та втрати енергії	Потоки та втрати ексергії
$F_0 = E'_0 + W_1$ , де $E'_0 = F_0(1 - \eta_0)$	$Ex_0 = Ex'_0 + Ex_1$ , де $Ex_0 = F_0 \frac{Q_p^e}{Q_p^h}$
$W_1 = E'_1 + W_{23}$ , де $E'_1 = W_1(1 - \eta_1)$	$Ex_1 = Ex'_1 + E_{23}$ , де $Ex_1 = W_1$
$W_{23} = E'_{23} + E_5 - E_n$ , де $E'_{23} = W_{23}(1 - \eta_{23})$	$Ex_{23} = Ex'_{23} + Ex_5 - Ex_n$ , де $Ex_{23} = W_{23}$

Енергоефективність ТПУ визначаємо наступним чином:

$$\eta_{23} = \frac{T_N}{T_N - T_L} \cdot \eta,$$

де  $T_N$  – температура, з якою підводиться теплота до ТПУ,  $K$ ;

$T_L$  – температура, з якою відводиться теплота,  $K$ ;

$\eta$  – коефіцієнт відповідності ефективності реальних ТПУ до ефективності за оборотних умов.

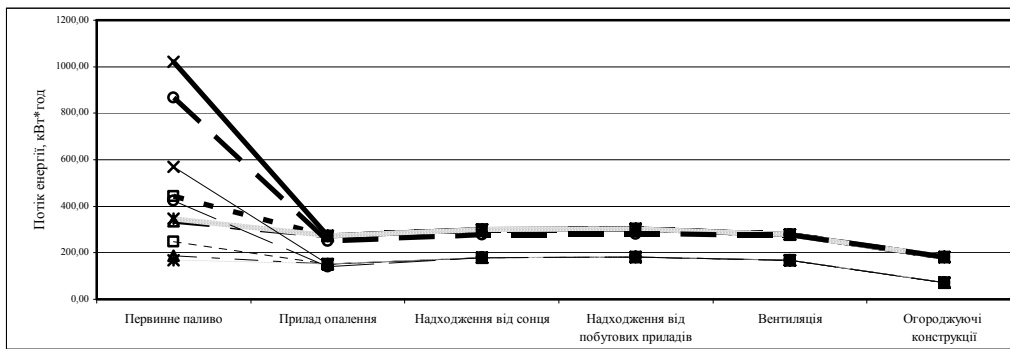
Приймаємо, що  $T_L$  дорівнює  $273 K$ , та припускаємо, що  $T_N$  змінюється при різному тепловому навантаженні будівлі, зумовленому зміною теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій, а  $\eta = 0,5$ .

На рис.2 показані кількісні характеристики потоків енергії (а) та ексергії (б) від різних джерел теплоти. Найбільше споживає енергії та первинного палива електричний котел, потім - кабельне та централізоване опалення. Низька енергоефективність електричного опалення обумовлена низькою енергоефективністю електростанцій. З енергетичного боку централізоване теплопостачання менш ефективне, ніж автономна котельня, через втрати енергії в тепловій мережі та тепловому пункті. Очевидно, що зростання теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій значно зменшує енергетичне навантаження будівлі та втрати вздовж усього ланцюга. При кращих теплозахисних властивостях огорожувальних конструкцій споживання первинного палива ТПУ стає меншим, ніж автономним газовим опаленням, що пояснюється зміною термодинамічної ефективності ТПУ.

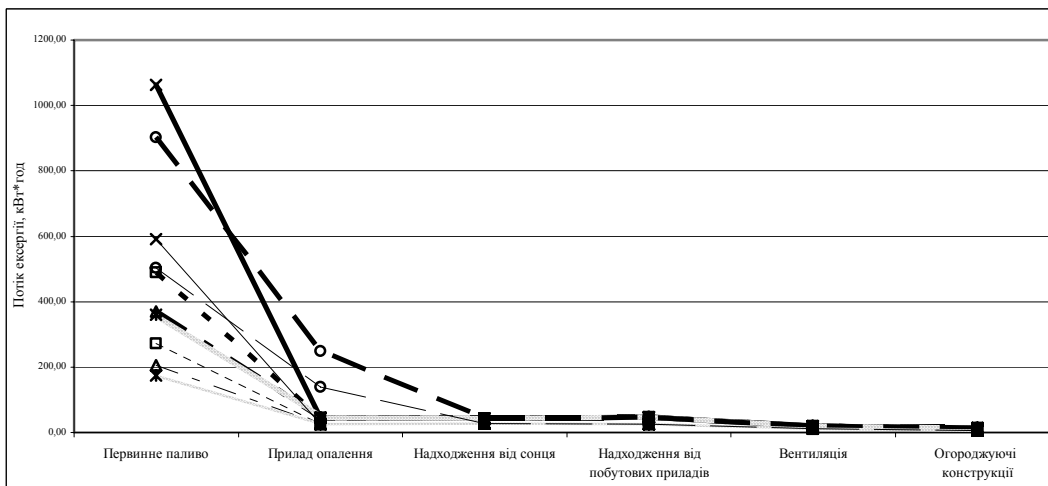
Для обох варіантів огорожувальних конструкцій ТПУ споживають менше ексергії первинного палива, ніж автономне газове опалення. Це обумовлено більшою ексергетичною

цінністю газу, що споживається котлом, порівняно з вугіллям для електростанції. Якщо з енергетичного боку кабелі в будинку є більш ефективними, ніж прилад опалення, то з ексергетичного боку - навпаки, оскільки цінність електричної енергії є більшою, ніж теплового потоку за обраних умов. Рис.2,б показує, що ексергетичне навантаження суттєво не змінюється при зміні теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій, проте навіть незначні зміни потреби в ексергії обумовлюють значне зменшення споживання первинного палива. Наведені значні втрати ексергії з боку постачання порівняно з боком споживання наголошують на необхідності оптимального вибору тих чи інших елементів системи тепlopостачання.

У табл. 7 продемонстровано, що при зростанні ефективності виробництва і постачання електричної енергії, споживання енергії/ексергії первинного палива при використанні ТПУ зменшується від 298,29/310,23 до 232,01/241,29 кВт·год для теплового захисту, що відповідає нормам 80-х років, і за обраних умов розрахунку становить навіть меншу величину, ніж потреба на опалення 277,44/15,35 кВт·год. Проведений ексергетичний аналіз також свідчить про зменшення споживання ексергії первинного палива при зростанні ефективності виробництва і постачання енергії, однак потреба в ексергії первинного палива є більшою ніж та ексергія, що втрачається в будівлі. Енергетичний та ексергетичний аналізи демонструють зростання ефективності ТПУ при зростанні теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій за рахунок зниження температурного потенціалу системи опалення.



а)



б)

Тепловий захист будівлі відповідає нормам 80-х років		Тепловий захист будівлі відповідає сучасним вимогам	
- □ -	Централізоване тепlopостачання	..... □ .....	Централізоване тепlopостачання
- △ -	Газовий котел	--- △ ---	Газовий котел
- × -	Електричний котел	- × -	Електричний котел
..... * .....	ТПУ	..... * .....	ТПУ
- ○ -	Кабельне опалення	- ○ -	Кабельне опалення

Рис.2. Потоки енергії/ексергії для різних джерел теплоти

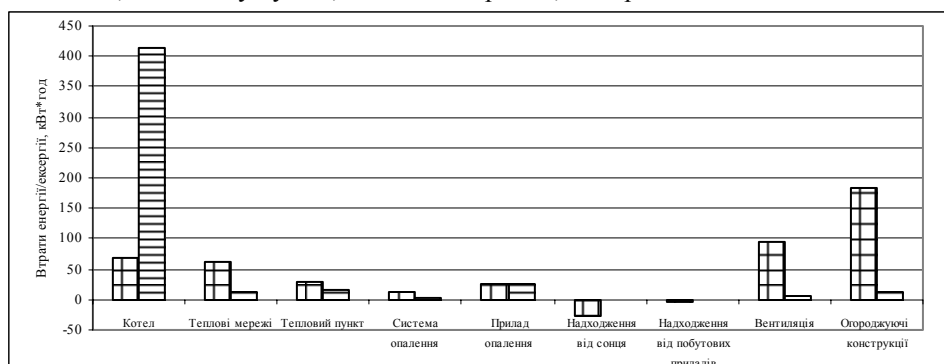
Таблиця 7

**Значення енергії/ексергії для ланцюга із ТПУ при різній ефективності виробництва і передачі електричної енергії**

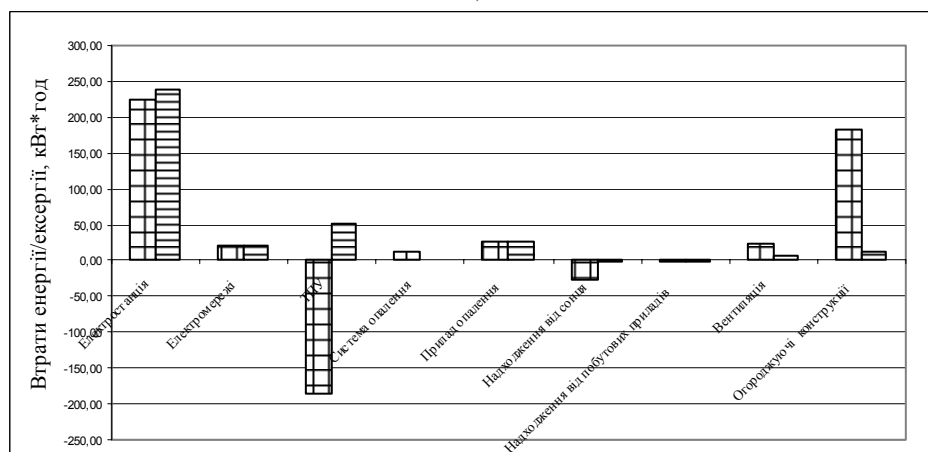
Ефективність виробництва і передачі електричної енергії	Енергія/ексергія первинного палива, кВт·год	Енергія/ексергія, що втрачається будівлею, кВт·год		
	Тепловий захист будівлі відповідає			
	нормам 80-х років	сучасним вимогам	нормам 80-х років	сучасним вимогам
$\eta_0 = 0,35, \eta_1 = 0,82$	345,58/359,41	168,17/175,27	277,44/15,35	168,01/12,1
$\eta_0 = 0,35, \eta_1 = 0,95$	298,29/310,23	145,1/151,28		
$\eta_0 = 0,45, \eta_1 = 0,95$	232,01/241,29	94,25/117,66		

**Втрати енергії/ексергії для ланцюга «виробництво – споживання теплової енергії»**

На рис. 4 показано втрати енергії та ексергії в різних елементах системи тепlopостачання та будівлі. Аналізуючи рис. 4а, де показано втрати енергії та ексергії для централізованого тепlopостачання, можна стверджувати, що з енергетичної точки зору доцільніше оптимізувати огороження будівлі, потім систему вентиляції (слід нагадати, що обрана модель відповідає нормам 80-х років, при зростанні термічного опору огорожень витрати енергії на вентиляцію стали б більшими за витрати в огорожувальних конструкціях), далі слід звернути увагу на котел (зростання ефективності використання газу характерне для конденсаційних котлів), теплові мережі, тепловий пункт та прилад опалення. Найбільші втрати ексергії характерні для котла, далі в приладі опалення, тепловому пункті, теплових мережах, в огороженнях та вентиляції відповідно.



а)



б)

Рис. 4. Втрати енергії, ексергії для різних джерел тепла:

а) централізоване тепlopостачання;

б) ТПУ

▨ втрати енергії

▨ втрати ексергії

Якщо говорити про автономну котельню, то найбільші втрати енергії, як і в попередньому випадку, на вентиляцію та через огорожувальні конструкції. При ексергетичному аналізі особливу увагу слід звернути на котел та прилад опалення. Отже, при проектуванні будівлі із низьким споживанням ексергії необхідно сконцентрувати особливу увагу на джерелі тепла або використовувати низькотемпературні системи опалення.

При ексергетичному аналізі ланцюга із електричним котлом визначаємо значні втрати ексергії в електричному котлі, що свідчить про недоцільність переведення високоякісної електричної ексергії в ексергію теплового потоку. Аналогічне пояснення значних втрат ексергії в кабелях при використанні кабельного опалення.

У системі із ТПУ (рис.4 б) значні втрати існують в електричній станції, існують втрати ексергії і в ТПУ, вони є більшими, ніж втрати в огорожувальних конструкціях і на вентиляцію.

Отже, проведений енергетичний і ексергетичний аналіз різних джерел тепlopостачання демонструє різний розподіл втрат вздовж ланцюга виробництва – споживання теплової енергії. Найбільші втрати енергії характерні для огорожувальних конструкцій та системи вентиляції, а ексергетичні втрати є максимальними на початку ланцюга, що свідчить про використання високоякісних енергетичних ресурсів для задоволення низькоякісних енергетичних потреб. Впливає необхідність застосування систем опалення і джерел тепла, що споживають низькоякісну енергію. Якщо говорити про перспективність систем опалення, то радіаторне опалення з ексергетичної сторони є вигіднішим, ніж кабельний обігрів, в подальшому слід проаналізувати ефективність використання теплої підлоги та конвекторних систем, де температурні рівні є нижчими.

Отже, із наведених діаграм можна стверджувати, що для створення будівлі із низьким споживанням ексергії, слід особливу увагу звернути на джерело теплоти, використовувати вторинні енергоносії, низькотемпературні системи опалення і збільшувати термічний опір огорожувальних конструкцій. Перспективними будівельними системами, для яких визначена достатньо висока ексергетична ефективність, є система опалення «тепла підлога» із температурними рівнями 45/30°C, конвектори 65/55°C та конденсаційні котли 45/30°C або 65/55°C [10].

#### Показники енергоефективності будівлі

Для оцінки енергоефективності будівлі та визначення класу енергоефективності в Україні використовується показник питомі тепловитрати на опалювальний період [2], який ґрунтується на теплотехнічних характеристиках огорожувальних конструкцій, враховує певні особливості системи опалення і не характеризує джерело теплоти. Європейські документи з теплових характеристик будівлі акцентуються на ефективності використання первинного палива, тому такий підхід доцільно розвивати і в Україні. Виходячи з цього, поряд з питомими витратами теплоти на опалення як енергетичний показник енергоефективності пропонуємо наступний:

$$\eta_T = \frac{Q_{81} + Q_{82} + Q_{83} + Q_{84} + Q_{85}}{F},$$

де  $F$  – кількість теплоти, що виділяється при згорянні первинного палива (для різних джерел тепла це може бути  $F_{21}$ ,  $F_{22}$  або  $F_0$ ), кВт·год.

Для оцінки ефективності використання ексергії первинного палива можна використовувати ексергетичний показник:

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

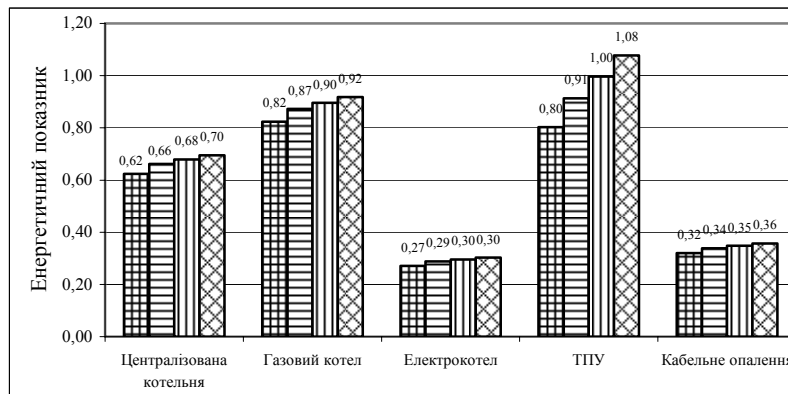
де  $Ex_F$  – ексергія первинного палива (для різних джерел тепла це може бути  $Ex_{21}$ ,  $Ex_{22}$  або  $Ex_0$ ), кВт·год.

Запропоновані показники розраховується за опалювальний період при чотирьох варіантах огорожувальних конструкцій: 1) термічний опір огорожувальних конструкцій відповідає нормам 80-х років [11]; 2) термічний опір огорожувальних конструкцій відповідає нормам 90-х років [12]; 3) термічний опір огорожувальних конструкцій відповідає нормам 2006-го року [2]; 4) термічний опір огорожувальних конструкцій кращий за норми 2006-го року на 30 %.

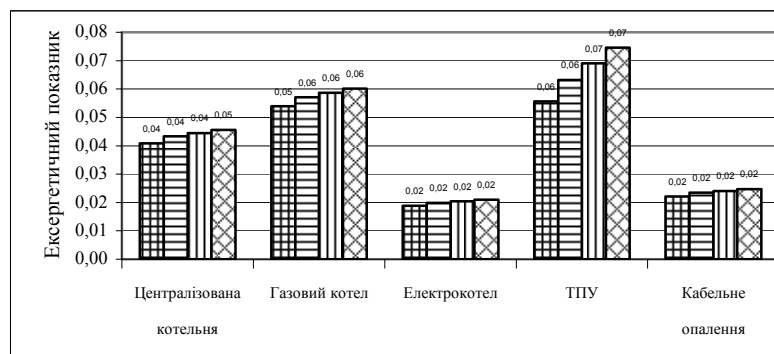
На рис. 5а представлено запропоновані показники ефективності використання первинного палива для різних джерел теплоти. Очевидно, що найменшу кількість первинного палива споживають ТПУ, потім автономне опалення, централізоване, кабельне та електричне. Більші



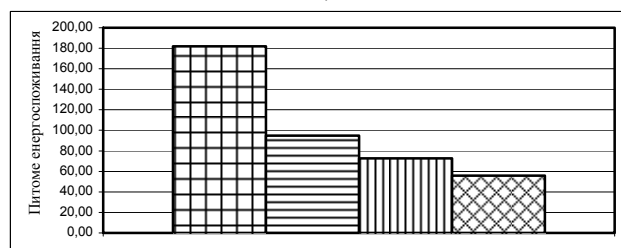
тенденції росту енергоефективності ТПУ при зростанні теплового захисту обумовлені збільшенням енергоефективності ТПУ. При найнижчому теплому захисті енергетична ефективність ТПУ (0,8) є нижчою, ніж газового котла (0,82). Це наголошує на необхідності підвищення термічного опору огорожувальних конструкцій при застосуванні системи із джерелом тепла ТПУ. Ексергетичні показники (рис. 5б) для ТПУ є вищими ніж для автономної котельні при всіх розглянутих варіантах огорожувальних конструкцій. Це обумовлено більшою цінністю природного газу, ніж кам'яного вугілля, що використовується для виробництва електроенергії. Порівняння запропонованого енергетичного показника та питомого споживання теплоти за опалювальний період показують, що останній не залежить від джерела теплоти, а змінюється тільки при зміні теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій. Це обґрунтовує доцільність використання  $\eta_e$  для порівняння ефективності різних будівель, оскільки він залежить від захисних властивостей огорожувальних конструкцій та від обраного джерела теплоти.



а)



б)



в)

Рис.5. Показники енергоефективності будівель  
 а) енергетичні;  
 б) ексергетичні;  
 в) питоме енергоспоживання

Термічний опір огорожувальних конструкцій			
	відповідає нормам 80-х років		відповідає нормам 2006-го року
	відповідає нормам 90-х років		кращий за норми 2006-го року на 30 %

Для ексергетичного показника ефективності використання первинного палива характерні ті ж тенденції, що і для енергетичного. Однак необхідність використання таких критеріїв пояснюється можливістю враховувати взаємозв'язки енергій різної фізичної природи в системі теплопостачання та дисипативні втрати потужності в елементах цієї системи, чим обумовлено подальший розвиток ексергетичного аналізу для оптимізації систем та концепцій теплопостачання.

#### Висновки

1. Проведений енергетичний і ексергетичний аналіз різних джерел теплопостачання показує різний розподіл втрат при використанні енергетичного і ексергетичного підходів. Найбільші втрати енергії характерні для огорожувальних конструкцій та системи вентиляції, а ексергетичні втрати є максимальними на початку ланцюга, що свідчить про використання високоякісних енергетичних ресурсів для задоволення низькоякісних енергетичних потреб.
2. Аналіз перспективності систем опалення показує, що радіаторне опалення з ексергетичного боку є вигіднішим, ніж кабельний обігрів, тому в подальшому слід проаналізувати ефективність використання теплої підлоги та конвекторних систем, де температурні рівні є нижчими.
3. Обґрунтовано доцільність застосування показника ефективності використання первинного палива для порівняння різних будівель, оскільки він залежить від захисних властивостей огорожувальних конструкцій і від обраного джерела теплоти. Цей показник демонструє найвищу ефективність систем із ТПУ, далі йде газовий котел, централізована котельня, кабельне опалення та електричний котел. Аналогічний ексергетичний показник демонструє ті ж тенденції, що і енергетичний, однак необхідність його застосування пояснюється можливістю враховувати взаємозв'язки енергій різної фізичної природи в системі теплопостачання та дисипативні втрати потужності в елементах цієї системи, що обумовлює подальше використання ексергетичного аналізу для розвитку концепцій та оптимізації систем теплопостачання у сучасному світі.
4. Подальші дослідження полягатимуть у врахуванні економічних показників розглянутих систем та вивченні комбінованого теплопостачання будівлі.

#### Література

1. Schmidt D., Shukuya M. Exergy: The Step Beyond the “energy” – Conscious design – a new look at sustainable Building // Proceedings to the Sustainable Building Conference 2005 (September 27-29, 2005). – Tokyo, Japan. – P. 87–92.
2. ДБН В.2.6-31: 2006. Теплова ізоляція будівель. – К.: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України, 2006. – 72 с.
3. Эксергетические расчеты технических систем: справ. пособие / Под ред. Долинского А.А., Бродянского В.М. – Киев: Наукова думка, 1991. – 360 с.
4. Маляренко В.А. Основы теплофизики зданий та энергозбереження: підручник. – Харків: САГА, 2006. – 484 с.
5. Tolga Balta M., Kalinci Y., Hepbasli A. Evaluating a low exergy heating system from the power plant through the heat pump to the building envelope // Energy & Buildings. – 2008. – V. 40. – P. 141–147.
6. Вітвіцький О.Р., Ямко М.П. Довідник енергоменеджера: методичний посібник. – Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2005. – 72 с.
7. Теплоснабжение: Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Высш. школа, 1980. – 408 с.
8. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика. – М.: Стройиздат, 1983. – 136 с.
9. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: Энергия, 1975. – 376 с.
10. Tono H., Angelotti A., Schmidt D. Exergy analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings: A critical view // Energy & Buildings. – 2009. – V. 41. – P. 112–122.
11. СНиП II – 3 – 79. Строительная теплотехника. – М.: Стройиздат, 1979. – 49 с.
12. СНиП II – 3 – 79\*\*. Строительная теплотехника. – М.: Стройиздат, 1979. – 49 с.