

УДК 697.9

Суходуб І.О., Нагорна С.О., керівник: Дешко В.І.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Інститут енергозбереження та енергоменеджменту, Кафедра теплотехніки та енергозбереження, м. Київ, Україна

### **ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ПЛАСТИНЧАСТОГО ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРА СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦІЇ**

*В статті визначаються та аналізуються техніко-економічні показники роботи пластинчастого мембранного теплоутилізатора в системах вентиляції з використанням детальних метеорологічних даних для м. Києва.*

*В статье определяются и анализируются технико-экономические показатели работы пластинчатого мембранного теплоутилизатора в системах вентиляции с использованием детальными метеорологических данных для г. Киева.*

*The paper identifies and analyzes technical and economic parameters of the plate membrane heat recovery unit in ventilation systems operation using detailed meteorological data for Kyiv.*

#### **Вступ**

Масовий перехід в житловому і адміністративно-громадському секторі (зокрема, не тільки при будівництві, але й при реконструкції і ремонті) на герметичні вікна на ряду з перевагами, наприклад, зменшення теплових втрат у тепловому балансі будівлі, покращення звукоізоляційних характеристик будівлі, має такий недолік, як погіршення стану мікроклімату в приміщеннях, де застосовуються системи природної вентиляції. Спроби забезпечувати повітрообмін за допомогою систем витяжної вентиляції не привели до покращення умов в приміщенні, так як можуть спричинити незбалансованість витрат припливного і витяжного повітря. Якщо ж регулювати повітрообмін за рахунок відкриття/закриття кватирок, то це приведе до переохолодження приміщення (збільшення навантаження на систему опалення).

Одним із шляхів зменшення енергоємності систем вентиляції, а відповідно і підвищення їх ефективності є використання повітря, яке видаляється з приміщення, для нагрівання припливного повітря за допомогою теплоутилізаторів. Такі системи, зокрема, широко використовуються в Північній Європі [1].

Існують наступні типи теплообмінників, які використовуються для утилізації в системах припливно-витяжної вентиляції [2]: пластинчастий рекуперативний, роторний регенеративний, з проміжним теплоносієм, з тепловими трубами, а також тепла камера та тепловий насос.

В даній статті розглядається рекуперативний пластинчастий теплообмінник, тому що він представляє найбільш доступний спосіб впровадження енергозберігаючих технологій при встановленні нових та реконструкції існуючих систем вентиляції шляхом обміну теплоти між витяжним і припливним повітрям. До того ж, їх встановлення можливе без заміни основних вузлів системи вентиляції. Рекуперативні теплообмінники виконуються у вигляді пакетів пластин, які розташовані таким чином, що вони утворюють два суміжні канали. По одному з них рухається витяжне повітря, по іншому – припливне.

Основними перевагами таких утилізаторів є: простота конструкції та відсутність рухомих частин; виключення потрапляння витяжного повітря у припливне; легкість технічного обслуговування; незначне додаткове споживання електричної енергії на приводи вентиляторів. Основними недоліками є: використання тільки при пересіканні припливного та

витяжного повітропроводів; можливість обмерзання теплообмінника у зимових період. В залежності від конструктивного виконання ефективність пластинчастих теплообмінників може знаходитися у діапазоні 50-80% та мати втрату напору в припливному та витяжному каналах від 50 до 250 Па. Захист рекуперативних теплообмінників від утворення інею в каналі витяжного повітря забезпечується попереднім підігрівом припливного повітря, регулюванням витрат припливного чи витяжного повітря та періодичним розморожуванням теплообмінника. В якості матеріалу теплообмінника може використовуватися ультратонка полімерна мембрана або спеціально оброблений папір, основна перевага якого є утилізація явного і прихованого тепла витяжного повітря [2].

### Способи оцінки ефективності теплоутилізаторів

Існують декілька способів оцінки ефективності утилізаторів теплоти [3]. Наприклад, основною є оцінка за допомогою коефіцієнтів ефективності теплообмінників (по явній, прихованій та повній теплоті). Інший спосіб оцінки ефективності побудований на основі ексергетичного ккд, який враховує ексергію потоку повітря та електричної енергії [4]. Ефективність утилізаційної установки також можливо оцінити за техніко-економічними показниками, наприклад, очікуваним терміном окупності додаткових капітальних затрат для різних типів теплоутилізаторів, значень їх ефективності, вартості і аеродинамічного опору. В даній статті розглядається оцінка ефективності теплоутилізатора на основі техніко-економічних показників.

В якості установки, що досліджувалась, була прийнята припливно-витяжна установка LGH 15-RX5 компанії Mitsubishi Electric [5], модельний ряд якої представляє собою каналну вентиляційну установку, яка складається з перехресно-струминного теплообмінника, припливного і витяжного вентиляторів, системи автоматики, байпасного пристрою та фільтрів, призначену для котеджів, квартир та невеликих офісів.

### Опис роботи теплоутилізатора при різних температурах

Згідно характеристик установки розглядаються такі температурні режими роботи:

- при температурах зовнішнього повітря в діапазоні  $t_{OA} = (-10 \dots -15) ^\circ\text{C}$  кожен годину припливний вентилятор вимикається на 10 хвилин та теплообмінник продувається теплим витяжним повітрям (для запобігання загрози замерзання теплообмінника);
- при температурах  $t_{OA} \leq -15 ^\circ\text{C}$  передбачається наявність попереднього нагріву (по датчику температури зовнішнього повітря); розрахунок утилізованого теплового потоку і потужності калориферів був проведений за допомогою програмного забезпечення Lossnay Selection & Lossnay Economical calculation [5].

### Показники енергетичної ефективності установки

Розрахунок утилізованої теплової енергії був проведений тільки для опалювального сезону з огляду на режим роботи теплоутилізатора за добу в приміщенні громадської будівлі: 24 години, 12 годин (з 9 до 21 години) і 8 годин (з 9 до 17 години).

Величина економії теплової енергії на опалення з урахуванням ентальпійного коефіцієнту ефективності визначалася [6]:

$$W_{total} = \sum_{i=k}^l \sum_{j=m}^n \left[ G_{ij} (h_{ij,RA} - h_{ij,OA}) \varepsilon_h \cdot K_{ij,1} \right] \cdot \tau, \quad (1)$$

де  $i$  – календарна доба року; для кожного з років містить два періоди: з 01 січня ( $k$ ) до 15 квітня ( $l$ ) включно; з 15 жовтня ( $k$ ) до 31 грудня ( $l$ ) включно;

$j$  – календарна година доби року; розглядається три варіанти: 8-ми ( $m=9, n=17$ ), 12-ти ( $m=9, n=21$ ) і 24-ох годинний ( $m=1, n=24$ ) режими роботи установки;

$G_{ij}$  - мінімальне з двох значень масової витрати витяжного або припливного повітря для кожної години, кг/с;

$h_{ij,RA}$  і  $h_{ij,OA}$  - погодинні значення ентальпії повітря всередині приміщення і ззовні, кДж /кг;  
 $\varepsilon_h$  - ентальпійний коефіцієнт ефективності по повній теплоті [6]:

$$\varepsilon_h = \frac{h_{SA} - h_{OA}}{h_{RA} - h_{OA}}, \quad (2)$$

де  $h_{SA}$  - погодинне значення ентальпії припливного повітря, кДж/кг·год;

$K_{ij,1}$  - коефіцієнт, який враховує відключення установки для попередження утворення інею:

- при  $t_{OA} \leq -15 \text{ } ^\circ\text{C}$  і  $t_{OA} > -10 \text{ } ^\circ\text{C}$   $K_{ij,1} = 1$  ; при  $-15 \text{ } ^\circ\text{C} < t_{OA} \leq -10 \text{ } ^\circ\text{C}$   $K_{ij,1} = 0,833$ ;

$\tau$  - крок розрахунку, 1 год.

Величина явної утилізованої теплової енергії з урахуванням температурного коефіцієнту ефективності визначалася [6]:

$$W_{sensible} = \sum_{i=k}^l \sum_{j=m}^n \left[ G_{ij} \cdot c_p (t_{ij,RA} - t_{ij,OA}) \varepsilon_t \cdot K_{ij,1} \right] \cdot \tau, \quad (3)$$

де  $t_{ij,RA}$  і  $t_{ij,OA}$  - погодинні значення температури повітря всередині приміщення і зовні,  $^\circ\text{C}$ ;

$c_p$  - значення середньої ізобарної теплоємності повітря, кДж/кг· $^\circ\text{C}$ ;

$\varepsilon_t$  - температурний коефіцієнт ефективності по явній теплоті [6]:

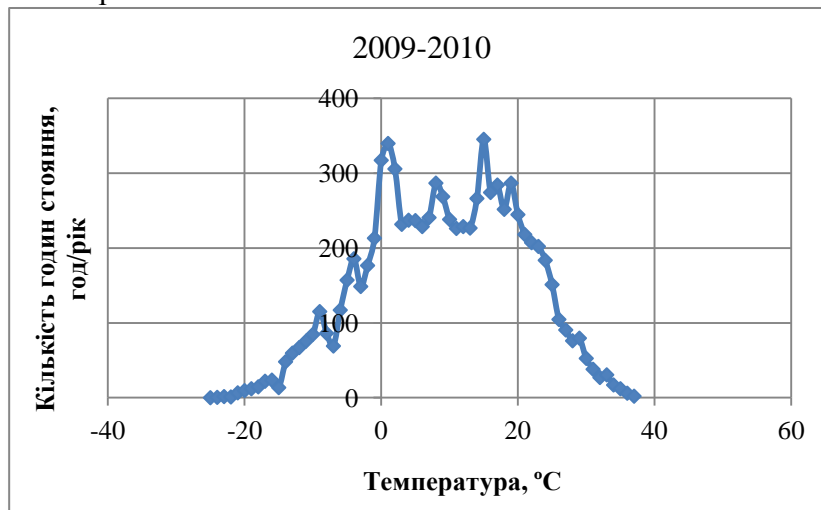
$$\varepsilon_t = \frac{t_{SA} - t_{OA}}{t_{RA} - t_{OA}}, \quad (4)$$

де  $t_{SA}$  – температура припливного повітря,  $^\circ\text{C}$ .

#### Вихідні дані і параметри для проведення оцінки ефективності

Для розрахунку систем вентиляції необхідні наступні вихідні дані: параметри навколишнього повітря (які є різними, в залежності від пори року) та параметри повітря всередині приміщення. Параметри всередині приміщення за умови ефективної роботи системи опалення будуть відповідати встановленим нормам [7], параметри зовнішнього повітря постійно змінюються.

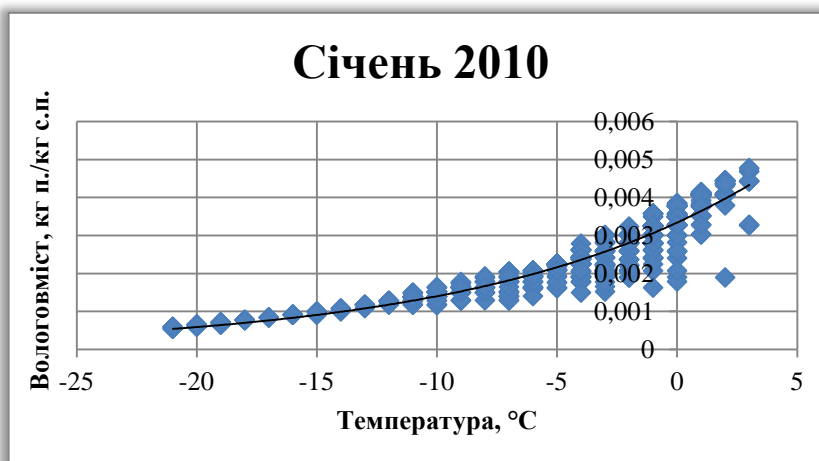
Для розрахунку величини утилізованої теплоти були взяті погодинні метеорологічні дані за 2009-2010 роки по м. Києву [8] (температура, відносна вологість, барометричний тиск). Температури зовнішнього повітря (їх середня кількість годин стояння протягом 2009-2010 років) представлені на рис.1.



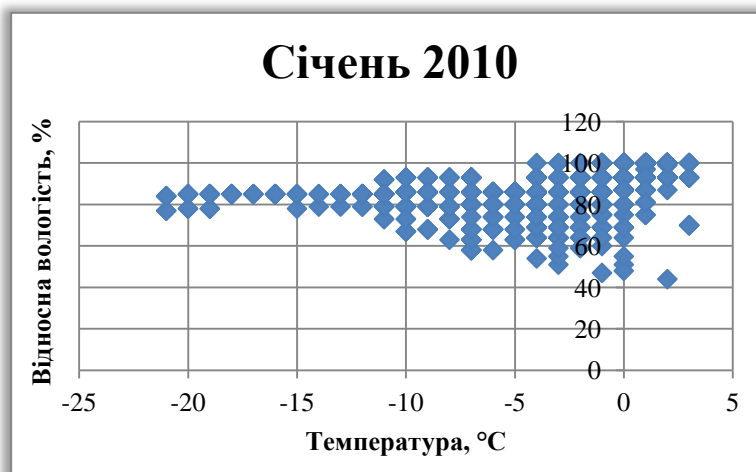
**Рисунок 1 – Середня кількість годин стояння температур за 2009-2010 роки для м. Києва**

Але використання графіків кількості годин стояння зовнішніх температур для установок утилізації повної теплоти ускладнюється у зв'язку з тим, що в кожній календарній годині значенню зовнішньої температури відповідає своє значення вологовмісту в залежності від метеорологічної ситуації. Також при їх використанні неможливо дослідити різні графіки роботи установки протягом доби (наприклад, при змінному режимі роботи установки). Тому, метою даної роботи є дослідження техніко-економічних показників роботи установки з використанням погодинних значень температури і вологості зовнішнього повітря та з врахуванням графіку роботи установки.

Помісячні погодні дані температури і вологовмісту (чи вологості) наведені на рис. 2-3.



**Рисунок 2 – Параметри зовнішнього повітря у співвідношенні температура-вологовміст за січень 2010 року**



**Рисунок 3 – Параметри зовнішнього повітря у співвідношенні температура-відносна вологість у січні 2010 року**

Аналогічні графіки результатів були отримані і для інших місяців розглянутого періоду. Аналізуючи отримані результати можемо побачити, що вологовміст експоненціально залежить від температури зовнішнього повітря, а графіки, які характеризують залежність температури зовнішнього повітря і вологості мають більший розкид точок. Така залежність виникає за рахунок багатьох параметрів, зокрема таких, як атмосферний тиск, хмарність, вологість, швидкість вітру, наявність дощу та ін., які впливають на вологість атмосферного

повітря. Тому дослідження техніко-економічних показників роботи установки проведено з використанням календарних погодинних значень температури та вологості зовнішнього повітря.

При визначенні техніко-економічних показників враховані затрати електроенергії на електроприводи припливного та витяжного вентиляторів та на калорифер.

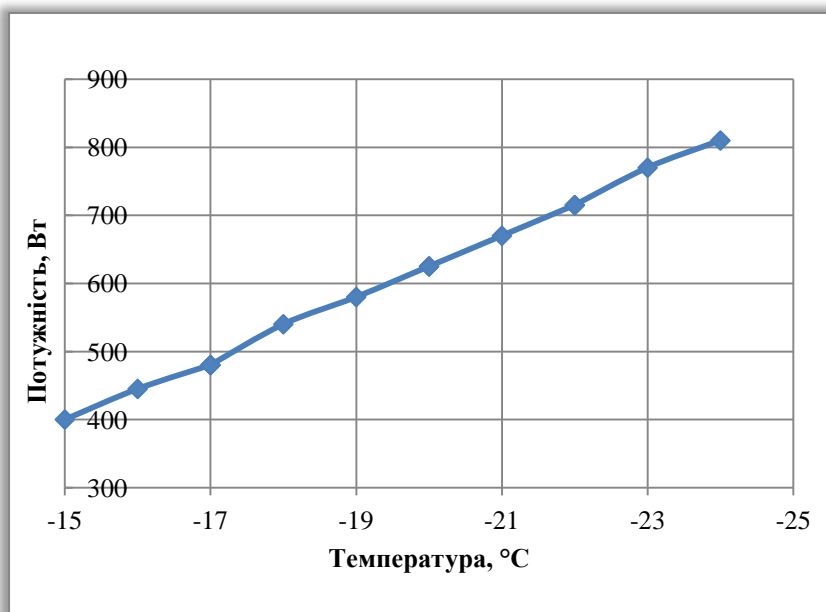
#### Параметри повітря в приміщенні

Для проведення розрахунку прийнято параметри, які занесені до табл 1.

**Таблиця 1 – Вихідні дані**

Назва параметру	Одиниці вимірювання	Значення
Температура в приміщенні в холодний період року	°C	20
Відносна вологість повітря в приміщенні	%	45
Витрата повітря	м <sup>3</sup> /год	150
$\varepsilon_n$	-	0,74
$\varepsilon_t$	-	0,811

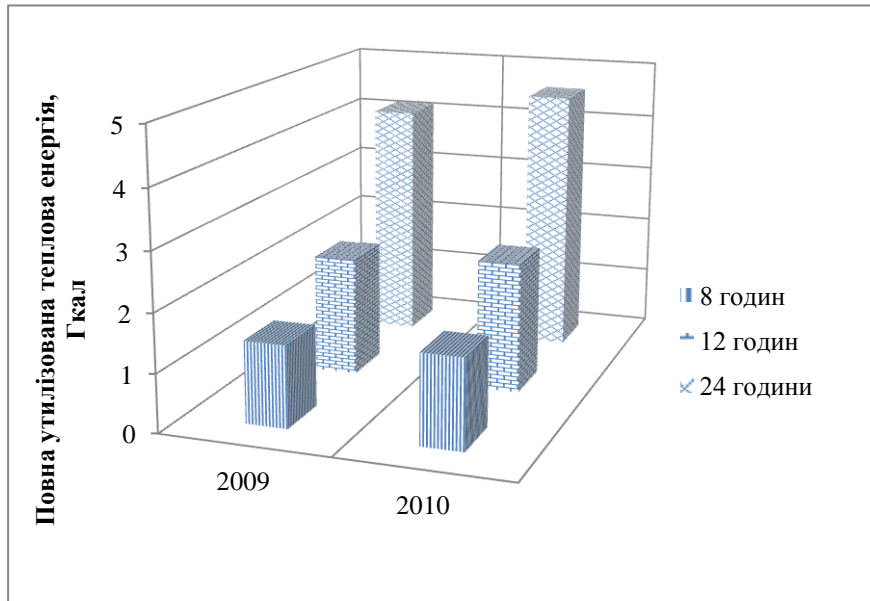
Потужності вибраних калориферів в залежності від температури зовнішнього повітря представлені на рис. 4. З нього видно, що потужність калорифера прямо пропорційно залежить від температури зовнішнього повітря.



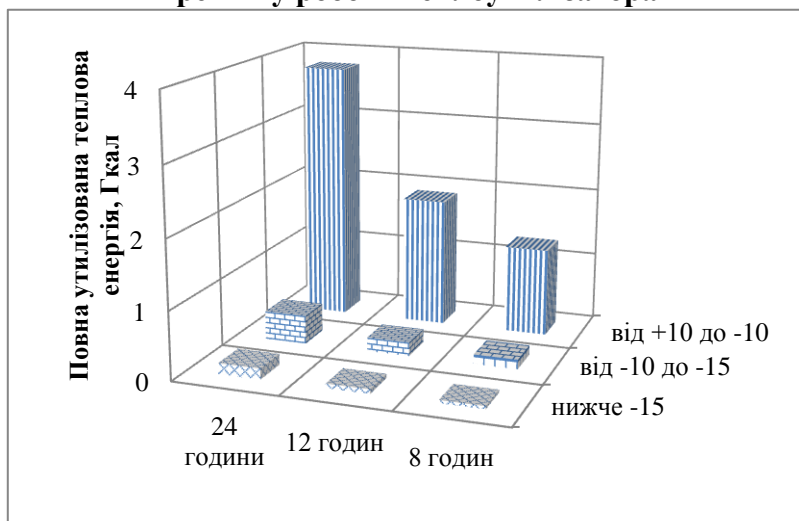
**Рисунок 4 – Потужність обраних калориферів**

#### Результати розрахунку

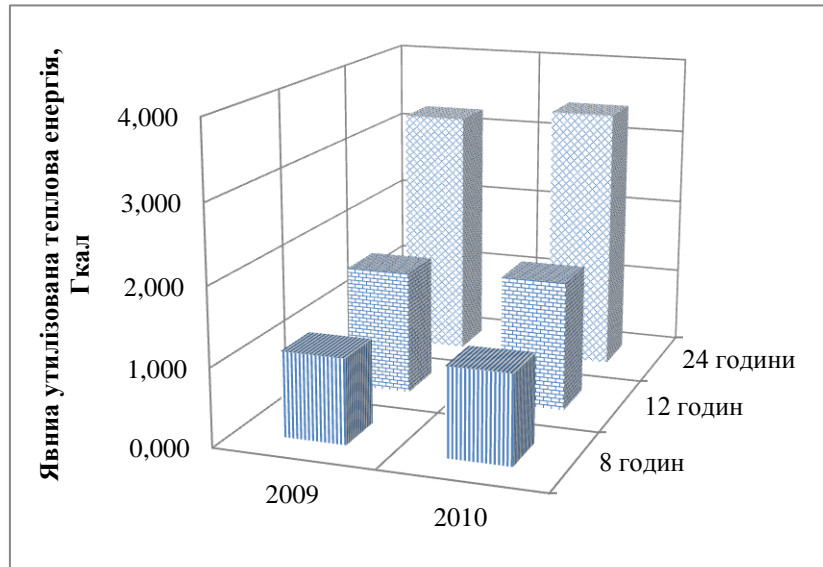
На рис.5 - 8 зображена повна та явна утилізована енергія в приміщенні в залежності від температурного режиму навколишнього середовища (холодний період року), а також від тривалості роботи теплоутилізаційної установки, виражена у Гкал. Величини утилізованої енергії та затрати на приводи вентиляторів та калорифери представлені в табл. 2, та будуть використані для розрахунку економії грошових коштів і терміну окупності впровадження даної установки.



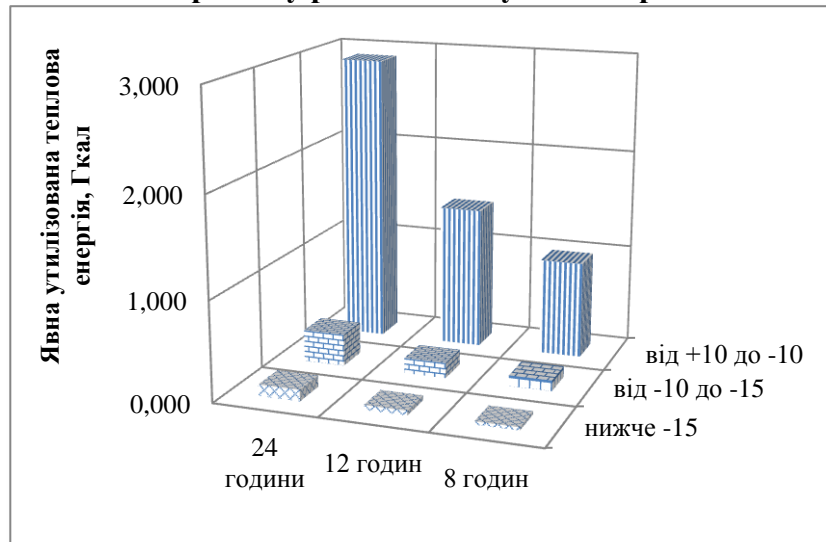
**Рисунок 5 – Повна утилізована теплова енергія за 2009-2010 роки в залежності від режиму роботи теплоутилізатора**



**Рисунок 6 – Повна усереднена утилізована теплова енергія за 2009-2010 роки згідно температурного режиму роботи теплоутилізатора, Гкал**



**Рисунок 7 – Явна утилізована теплова енергії за 2009-2010 роки в залежності від режиму роботи теплоутилізатора**



**Рисунок 8 – Явна усереднена утилізована теплова енергії за 2009-2010 роки згідно температурного режиму роботи теплоутилізатора**

**Таблиця 2 – Усереднена утилізована теплова енергії за 2009-2010 роки та електроенергії на приводи вентиляторів і калорифер**

Режим роботи теплоутилізатора	$W_{TOTAL}$ , Гкал/ кВт·год	$W_{SENSIBLE}$ , Гкал/ кВт·год	$W_{FAN}$ , кВт·год	$W_{CALORIF}$ , кВт·год
24 години	4,36 / 5070,9	3,335 / 3879,0	876,0	52,9
12 годин	2,15 / 2502,9	1,633 / 1898,9	438,0	20,9
8 годин	1,47 / 1711,4	1,114 / 1296,3	292,0	13,6

Наведені в діаграмах і таблицях результати обчислень показують, що більша величина утилізованої енергії буде при 24-годинному режимі роботи теплоутилізатора. Так як, за рахунок того, що протягом опалювального періоду року спостерігається незначна повторюваність температур  $t_{OA} \leq -15$  °C, то затрати енергії на попередній нагрів складають незначну частину від утилізованої енергії (близько 1%).



**Економія грошових коштів і терміни окупності для громадських будівель**

При розрахунку економії грошових коштів розглядається два варіанти:

- економія теплової енергії від мережі тепlopостачання;
- економія електроенергії при заміщенні електричного опалення.

Величина економії грошових коштів визначається за наступним виразом [9]:

$$E = W_{TOTAL} \cdot T_{HEAT/EL} - (W_{FAN} + W_{CALORIF}) \cdot T_{EL}, \quad (5)$$

де  $W_{TOTAL}$  - утилізована енергія, Гкал або кВт·год;

$T_{HEAT/EL}$  - тариф, відповідно, на теплову або електричну енергію, грн./Гкал або грн./кВт·год;

$W_{FAN}$  і  $W_{CALORIF}$  - споживана електроенергія приводами вентиляторів та калорифером відповідно, кВт·год.

Тарифи на електричну та теплову енергію були взяті на сайті ПАТ «Київенерго» для юридичних споживачів [10], а вартість припливно-витяжної установки - у офіційних дилерів-виробників [5].

Розрахунки економії грошових коштів і терміни окупності наведені в табл. 3.

**Таблиця 3 – Економія грошових коштів**

Режим роботи теплоутилізатора	$E_{тепл}$ , грн./ $T_{ок}$ , роки	$E_{ел.ен}$ , грн./ $T_{ок}$ , роки
24 години	4135,5 / 2,73	4354,0 / 2,59
12 годин	2046,5 / 5,52	2149,1 / 5,26
8 годин	1400,1 / 8,07	1478,1 / 7,65

**Ефективність утилізації теплоти**

Якість та вартість енергії, що використовують приводи вентиляторів для подолання опору елементів системи та калорифери, є вищою, ніж тієї, яку утилізує теплообмінник. Для оцінки довгострокової ефективності теплоутилізаторів можна використовувати коефіцієнт повернення енергії (ratio of energy recovery - RER):

$$RER = \frac{W_{TOTAL}}{N_{FAN} \cdot T_{FAN} + N_{CALORIF} \cdot T_{CALORIF}}, \quad (6)$$

де  $N_{FAN}$  і  $N_{CALORIF}$  – потужність приводу вентилятора і калорифера, кВт;

$T_{FAN}$  і  $T_{CALORIF}$  – час роботи вентиляторів і калорифера відповідно, год.

Коефіцієнт повернення енергії приведений до витрати первинного палива на одиницю виробленої енергії (теплової і електричної):

$$RER = \frac{W_{TOTAL}}{N_{FAN} \cdot T_{FAN} + N_{CALORIF} \cdot T_{CALORIF}} \cdot \frac{B_{HEAT}}{B_{EL}}, \quad (7)$$

де  $B_{HEAT}$  і  $B_{EL}$  - питомі витрати первинного палива на виробництво теплової і електричної енергії [10].

Розрахунок коефіцієнтів повернення енергії (6-7) представлений у табл. 4.

**Таблиця 4 - Коефіцієнт повернення енергії (RER)**

	Відносний RER	Відносний RER (приведений)
24 години	5,74	3,19
12 годин	5,7	3,17
8 годин	5,85	3,26

Зі значення коефіцієнту повернення енергії видно, що для кліматичних умов України при різних режимах роботи утилізована теплова енергія у 6 разів перевищує затрати



електроенергії на приводи вентиляторів і у 3 рази перевищує затрати при приведенні до витрати первинного палива на одиницю виробленої енергії.

### **Висновки**

В результаті проведення техніко-економічного розрахунку буди визначені наступні енергетичні і економічні показники:

- Величина повної утилізованої теплової енергії з урахуванням ентальпійного коефіцієнту ефективності;
- Величина явної утилізованої теплової енергії з урахуванням температурного коефіцієнту ефективності;
- Економія теплової енергії від мережі при умові застосування регуляторів на опалювальних приладах і приладів обліку та терміни окупності;
- Економія електроенергії при зменшенні потужності електрообігрівачів та терміни окупності;
- Коефіцієнт повернення енергії (RER).

При розгляданні варіанту заміщення електричної і теплової енергії, а також проведення розрахунків простих термінів окупності можна зробити висновок про те, що найшвидше установка даного типу окупиться при її 24-годинному режимі роботи.

Терміни окупності при заміщенні теплової або електричної енергії при відповідних режимах роботи майже однакові (співрозмірність тарифів на електричну і теплову енергію, які були визначені за даними [10]).

До того ж при розгляданні коефіцієнту повернення енергії, його показники для різних режимів роботи є практично мало відмінними, тобто ефективність по коефіцієнту повернення енергії не залежить від тривалості роботи установки на добу.

### **Список використаних джерел**

1. R. Besant, C. Simonson, Air-to-Air Exchangers ASHRAE Journal April 2003 pp. 42-50
2. Справочник по теплообменникам: В2 т. Т. 1 / Пер. с англ. под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.: ил.
3. Липа А.И. Кондиционирование воздуха. Основы теории. Современные технологии обработки воздуха. Изд. Второе, перераб., доп., Одесса: ОГАХ, Издательство: «Издательство ВМВ», 2010. – 607 с., ил.
4. Рекуперация тепловой энергии в системах вентиляции и кондиционирования воздуха [Электронный ресурс], Е.П. Вишневский, электронный Энергосервисной компании «Экологические системы» №4, апрель 2008, [http://www.esco.co.ua/journal/2008\\_4/index.htm](http://www.esco.co.ua/journal/2008_4/index.htm)
5. <http://www.mitsubishi-aircon.ru>
6. Дешко В.І., Суходуб І.О., Нагорна С.О. Ефективність утилізації теплоти в рекуперативних теплообмінниках систем вентиляції. – Енергетика та електрифікація, 2010, №12, с.37-43.
7. СНіП 2.04.05-91\*. Отопление, вентиляция и кондиционирование. К. 1996, - 89 с.
8. [www.meteoprolog.ua/ua/climate/Kyiv/](http://www.meteoprolog.ua/ua/climate/Kyiv/)
9. Иванов О.П., Рымкевич А.А. Методика комплексной оценки эффективности использования утилизации тепла и холода в системах кондиционирования воздуха. – Холодильная техника, 1980, №3, с.34-38.
10. Офіційний сайт ПАТ «Київенерго» - <http://kyivenergo.ua/>