

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ З МЕМБРАННИМ РЕКУПЕРАТИВНИМ ТЕПЛООБМІННИКОМ В КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ М. КИЄВА

Розвиток управління системами вентиляції і підвищення рівня їх енергоефективності висуває завдання вдосконалення методів їх техніко-економічного аналізу, в тому числі доцільності застосування системи вентиляції з теплоутилізаторами. В загальному випадку вони дозволяють утилізувати явну і приховану теплоту, тому для аналізу потрібно використовувати наступні дані для зовнішнього повітря: температура, відносна вологість (або вологовміст) та тиск.

В залежності від конструктивного виконання ефективність пластинчастих теплообмінників може знаходитися у діапазоні 50-80 % [1]. Захист рекуперативних теплообмінників від утворення інею в каналі витяжного повітря може забезпечуватися попереднім підігрівом припливного повітря, регулюванням витрат припливного чи витяжного повітря та періодичним розморожуванням теплообмінника. Вибір метода боротьби з утворенням інею в значній мірі впливає на економічний ефект від впровадження теплоутилізатора [2].

В роботах [3, 4] при аналізі системи вентиляції з теплоутилізаторами в якості параметрів зовнішнього повітря використовувалася тривалість стояння температур зовнішнього повітря. Розглядається різний час роботи установки на добу (8, 12, 24 години), попередній нагрів при температурах ≤ -5 °C, але при цьому не враховується коливання температури зовнішнього повітря протягом доби і режими розморожування теплообмінника. В роботі [5] пропонується визначати економію теплової енергії з використанням середньої температури зовнішнього повітря та тривалості опаловального сезону, що приймаються згідно нормативних документів.

У даній роботі в якості об'єкта техніко-економічного аналізу була обрана вентиляційна установка з мембранним рекуперативним теплообмінником, з витратою повітря 150 м³/год і коефіцієнтами ефективності по повній і явній теплоті $\eta_h = 0,73$ та $\eta_t = 0,8$ відповідно. Для приміщення параметри повітря складають: температура 20 °C та відносна вологість 40%.

Методи осереднення метеоданих

Розглянуто наступні методи узагальнення метеоданих: 1) по числу годин стояння (ЧГС) (рис. 1) і середньому вологовмісту для кожної

температури для опалювального періоду (рис. 2); 2) по середнім температурам і вологовмістам для кожного місяця; 3) з використанням медіани температур і вологовмісту для кожного місяця; 4) за середньою температурою і вологовмістом та тривалістю опалювального сезону. Вони порівнювалися з детальним розрахунком по зібраним півгодинним даними по температурі, відносній вологості і тиску зовнішнього повітря для м. Києва за опалювальний сезон 2011-2012 рр.. (з 15.10.11 по 15.04.12) [<http://www.wunderground.com/weather-forecast/UR/Kyiv.html>].

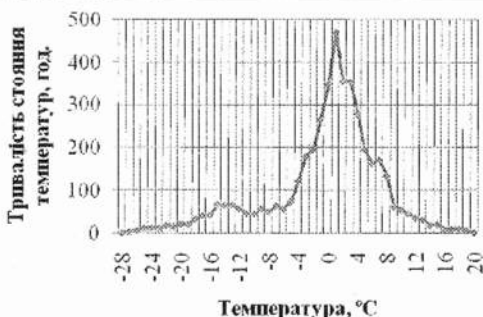
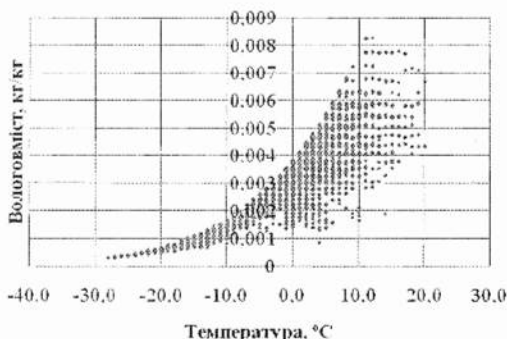


Рис. 1 – Число годин стояння зовнішніх температур для опалювального періоду



**Рис. 2 - Вологовміст в залежності від температури
Розрахунок економії теплової енергії**

Розглянемо дві стратегії боротьби з заморожуванням теплоутилізатора:

- а) при температурі зовнішнього повітря (*outside air - OA*) $t_{OA} \leq -5^{\circ}\text{C}$ передбачається наявність попереднього нагріву припливного повітря (потужність повітронагрівача обрана по температурі -22°C і складе 0,6 кВт, при температурах $t_{OA} \leq -22^{\circ}\text{C}$ установку можна переключати на понижену витрату повітря);

б) при температурах в діапазоні $t_{OA} = (-10 \dots -15) ^\circ\text{C}$ через кожні 60 хв. припливний вентилятор вимикається на 10 хв. та теплообмінник продувається теплим витяжним повітрям; при температурах $t_{OA} \leq -15 ^\circ\text{C}$ передбачається наявність попереднього нагріву (потужність повітронагрівача складає 0,6 кВт).

Розрахунок економії теплової енергії був проведений тільки для опалювального сезону з огляду на режим роботи теплоутилізатора за добу: 24-годинний (цілодобово), денний 12-годинний (з 8 до 20 години) і нічний 12-годинний (з 20 до 8 години).

Величина економії повної (*total*) теплової енергії на опалення з урахуванням ентальпійного коефіцієнту ефективності по півгодинним метеорологічним даним визначалася [6]:

$$\Delta W_{TOTAL} = \sum_{i=k}^l \sum_{j=m}^n [G_v (h_{ij,RA} - h_{ij,OA}) \eta_h] \cdot \tau, \quad (1)$$

де i – календарна доба року: з 15 квітня (k) до 15 жовтня (l) включно; j – календарні півгодини доби року; розглядається три варіанти: денний 12-ти ($m=8:00$, $n=19:30$), нічний 12-ти ($m=20:00$, $n=7:30$) і 24-ох годинний ($m=00:00$, $n=23:30$) режими роботи установки; G_{ij} – масова витрата витяжного та припливного повітря для кожної півгодини, кг/с; $h_{ij,RA}$ і $h_{ij,OA}$ – півгодинні значення ентальпії повітря всередині приміщення (*room air* – RA) і зовні, кДж /кг (при відповідних температурах зовнішнього повітря ентальпія $h_{ij,OA}$ розраховується з використанням потужності повітронагрівача; τ – крок розрахунку, 0,5 год. (при $t_{OA} \leq -10 ^\circ\text{C}$ $\tau = 0,429$ год. з врахуванням відключення установки для розморожування теплообмінника).

Величина економії явної (*sensible*) теплової енергії з урахуванням температурного коефіцієнту ефективності визначалася [6]:

$$\Delta W_{SENSIBLE} = \sum_{i=k}^l \sum_{j=m}^n [G_{ij} \cdot c_p (t_{ij,RA} - t_{ij,OA}) \eta_t] \cdot \tau, \quad (2)$$

де $t_{ij,RA}$ і $t_{ij,OA}$ – півгодинні значення температури повітря всередині приміщення і зовні, $^\circ\text{C}$ (при відповідних температурах зовнішнього повітря $t_{ij,OA}$ розраховується з використанням потужності повітронагрівача; c_p – значення середньої ізобарної теплоємності повітря, кДж/кг $\cdot^\circ\text{C}$. У формулі (2) параметри часових інтервалів такі, як у (1).

Значення економії повної та явної теплової енергії за опалювальний період для трьох режимів роботи установки наведені в табл. 1. Для різних типів будівель характерний різний графік роботи, а останні чотири методи не дають можливості урахування коливань температури протягом доби. Також останні три метода не враховують режимів боротьби з інесутворенням. Тому для врахування умов заморожування теплообмінника при метеорологічних умовах м. Києва більш доцільним є використовувати ЧТС температур для опалювального періоду і середній вологовміст для кожної температури (похибка неврахування коливання температури складає $\pm 5\%$).

Таблиця 1

Значення повної / явної економії теплової енергії за опалювальний період, кВт·год

Метод розрахунку	Цілодобово	С 8:00 до 20:00	С 20:00 до 8:00
30-хвилинні значення*	3940 / 3220	1890 / 1540	2050 / 1680
	4130 / 3440	1980 / 1640	2150 / 1800
Число годин стояння температур*	3970 / 3220	1985 / 1610	1985 / 1610
	4160 / 3440	2080 / 1720	2080 / 1720
Середньомісячні	4300 / 3630	2150 / 1815	2150 / 1815
Медіани за місяць	4350 / 3650	2180 / 1825	2180 / 1825
Середні за опалювальний період	4320 / 3660	2160 / 1830	2160 / 1830

*З врахуванням режимів розморожування та попереднього нагріву: перший рядок - відповідають варіанту *a*, другий – *б*.

При визначенні техніко-економічних показників враховані затрати електроенергії на електроприводи припливного та витяжного вентиляторів W_{FAN} та на повітрянагрівач W_{HEATER} за опалювальний сезон (табл. 2).

Таблиця 2

Затрати енергії на приводи вентиляторів і повітрянагрівач

Режим роботи теплоутилізатора	W_{FAN} , кВт·год	W_{HEATER} , кВт·год
24 години	350	520
		180
денний 12 годин	175	220
		70
нічний 12 годин	175	300
		110

За рахунок того, що протягом опалювального періоду року спостерігається незначна повторюваність температур $t_{OA} \leq 15^{\circ}\text{C}$, то затрати енергії на попередній нагрів для варіанту методу боротьби з інесутворенням *б* складають незначну частину від утилізованої енергії (близько 4,5 %), для варіанту *а* ця цифра складає близько 13 %.

Економія грошових коштів і терміни окупності

Капіталовкладення включають вартість установки, її монтажу (15-20 % від вартості установки) та вартість електричного повітрянагрівача (разом близько 13000 грн.).

При розрахунку економії грошових коштів використано детальні півгодинні дані. При цьому розглядається два варіанти енергопостачання: економія теплової енергії від мережі теплопостачання; економія енергії електричного опалення.

Величина економії грошових коштів визначається за наступним виразом [7]:

$$E = \Delta W_{\text{TOTAL}} \cdot T_{\text{HEAT/EL}} - W_{\text{FAN}} \cdot T_{\text{EL}} - W_{\text{HEATER}} \cdot (T_{\text{EL}} - T_{\text{HEAT/EL}}), \quad (3)$$

де ΔW_{TOTAL} - економія теплової енергії, кВт·год; $T_{\text{HEAT/EL}}$ - тариф, відповідно, на теплову (*heat*) або електричну (*el*) енергію, грн./кВт·год; W_{FAN} і W_{HEATER} - споживана електроенергія приводами вентиляторів та повітрянагрівачем відповідно, кВт·год.

Остання складова у формулі (3) - це зменшення економії при використанні електричного повітрянагрівача для попереднього нагріву та теплової енергії для опалення і враховує різницю вартості електричної та теплової енергії. Тарифи на електричну та теплову енергію були взяті на сайті ПАТ «Київенерго» для юридичних споживачів.

Таблиця 3

Економія грошових коштів та терміни окупності

Режим роботи теплоутилізатора	E_{HEAT} , грн./ τ_{HEAT} , роки	E_{EL} , грн./ τ_{EL} , роки
24 години	2690 / 4,8	4080 / 3,2
	2960 / 4,4	4290 / 3,0
денний 12 годин	1290 / 10,0	1950 / 6,7
	1410 / 9,2	2050 / 6,3
нічний 12 годин	1400 / 9,3	2130 / 6,1
	1540 / 8,4	2240 / 5,8

Як видно з табл. 3 термін окупності вентиляційної установки може коливатися від 3 до 10 років в залежності від типу енергії, стратегії боротьби з інесутворенням та режиму роботи установки. У всіх режимах роботи та незалежно від типу енергії ефективніше використовувати стратегію розморожування б.

Ефективність утилізації теплоти

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

$$RER = \frac{\Delta W_{TOTAL}}{W_{FAN} + W_{HEATER}} \cdot K, \quad (4)$$

де K – коефіцієнт приведення.

Коефіцієнт приведення K для випадку використання електричної енергії на опалення приймає значення 1, для випадку теплової:

$K = B_{HEAT} / B_{EL}$ для приведення до витрати первинного палива

($RER_{PRIM,EN}$) та $K = T_{HEAT} / T_{EL}$ - до вартості енергії (RER_{COST}), де

B_{HEAT} і B_{EL} - питомі витрати первинного палива на виробництво теплової і електричної енергії.

Зі значень коефіцієнту повернення енергії (табл. 4) видно, що для кліматичних умов України при цілодобовому режимі роботи утилізована теплова енергія у 4,5 та 7,8 разів перевищує затрати електроенергії на приводи вентиляторів для варіантів а та б відповідно.

Таблиця 4

Коефіцієнт повернення енергії (RER)

Режим роботи теплоутилізатора	RER	$RER_{PRIM,EN}$	RER_{COST}
24 години	4,5	2,6	3,3
	7,8	4,5	5,7
денний 12 годин	4,8	2,8	3,5
	8,1	4,7	5,9
нічний 12 годин	4,3	2,5	3,1
	7,5	4,4	5,5

Висновки

Значення економії повної теплової енергії (з використанням ентальпій) є більшим у порівнянні з явною (з використанням температур) на 20-22 %. Затрати на приводи вентиляторів складають близько 8-9 % від величини економії енергії, а на повітрянагрівач – 13 та

4,5 % відповідно для стратегій боротьби з інесутворенням *a* та *б*. Значення *RER* відповідно складають 4,5 та 7,8, а з приведенням до первинного палива – 2,6 та 4,5, до вартості енергії – 3,3 та 5,7.

Список літератури:

1. Besant R., Simonson C. Air-to-Air Exchangers // ASHRAE Journal. – April 2003. – pp. 42-50
2. Еремкин А.И., Королева Т.И., Данилин Г.В. и др. Экономическая эффективность энергосбережения в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха: Учебное пособие. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. – 184 с.
3. Иванов О.П., Тихомиров С.А. Анализ сроков окупаемости пластинчатого и роторного теплоутилизаторов // Холодильная техника и кондиционирование. – 2007. – №1. – С.1-5
4. Ватин Н.И., Смотралова М.В. Техничко-економическое обоснование применения систем вентиляции с роторной рекуперацией тепла. – Санкт-Петербургский государственный политехн. ун-т, 2003. – 75 с.
5. Гусев А.Е., Митюков Н.В. Разработка программы для обоснования установки рекуператора в системе вентиляции // Геоинженеринг. – 2011. - №1 (10). – С. 20-24
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. 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.

Надійшла до редакції 18.10.2012р.