

УДК 697.34(0.75):621.1.016.7

**Дослідження ексергетичного коефіцієнта корисної дії водяних теплових мереж і систем опалення**В. І. Деньгуб<sup>1</sup>, В. А. Коновалюк<sup>2</sup><sup>1</sup>к.т.н., доц. Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна, vitdengub@gmail.com<sup>2</sup>к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, viktorija.konovalyuk@gmail.com

*Анотація. Проведене дослідження ефективності ексергії шляхом визначення ексергетичного коефіцієнта корисної дії (ЕККД) залежно від режиму роботи теплових мереж та температури зовнішнього повітря на основі визначень характеристик ексергії  $\epsilon$  (корисно використаної теплоти) та анергії  $a$  (безповоротно втраченої теплоти) в навколишньому середовищі. Отримана розрахункова формула для визначення ексергетичного коефіцієнту корисної дії  $\eta_e$  для теплових мереж. Виконані розрахунки ексергетичного коефіцієнта корисної дії для різних режимів регулювання теплового навантаження. Визначено, що при регулюванні режимів теплопостачання за «підвищеними» графіками значення ексергетичного коефіцієнта корисної дії зменшується і знаходиться в діапазоні 0,90...0,941. Також виконана оцінка ексергетичної ефективності систем опалення житлових будинків при режимах регулювання за «опалювальними» та «підвищеними» графіками. Визначені ексергетичні коефіцієнти корисної дії опалювальних систем, які на 1,2...1,8 % вищі за ексергетичний коефіцієнт корисної дії теплових мереж. Це пояснюється тим, що в системі опалення не враховується анергія безповоротних втрат теплоти від подавального теплопроводу. Наведені результати розрахунків ексергетичного коефіцієнта корисної дії для опалювальних систем: при режимах регулювання за «опалювальними» графіками –  $\eta_e$ ; за «підвищеними» графіками –  $\eta_e'$ . Доведено, що зі зменшенням температури зовнішнього повітря значення ексергетичного коефіцієнта корисної дії також зменшуються. Рекомендується при середньорічній температурі зовнішнього повітря за опалювальний період в інтервалі від 1,0 до 2,0 °C для теплових мереж застосовувати «опалювальні» графіки регулювання.*

*Ключові слова: ексергетичний ККД, теплові мережі, анергія, ексергетична ефективність.*

**Вступ.** У містах України централізоване теплопостачання переважно здійснюється через закриті водяні теплові мережі з якісним регулюванням теплового навантаження. На основі мінімізації приведених річних економічних витрат розроблені наступні методики: визначення оптимальних перепадів температури між теплоносієм в подавальному і зворотному трубопроводах; лінійних втрат тиску в теплопроводах; товщини теплової ізоляції трубопроводних мереж [1, 2].

**Актуальність дослідження.** Через зношеність теплових мереж і зростання потоку відмов роботи елементів мережі збільшується кількість аварій різного типу. Для їхнього зменшення підприємства теплопостачання частково вимушені змінювати режими експлуатації теплових мереж порівняно з оптимальними. Внаслідок цього зменшується якість обслуговування абонентів теплової мережі при опаленні будівель та постачанні гарячої води. Одним із методів оцінки ефективності роботи теплових мереж є дослідження ексергетичного коефіцієнта корисної дії  $\eta_e$  (ЕККД).

**Останні дослідження та публікації.** Проводились дослідження і аналіз ЕККД окремих санітарно-гігієнічних систем та обладнання теплових мереж. Так, наприклад, в дослідженнях В. Й. Лабая та О. В. Задояного проаналізовані ексергетичні коефіцієнти кори-

сної дії систем кондиціонування повітря різного призначення [3, 4]. Е. С. Малкіним і Н. Є. Журавською виконані енергетичні та ексергетичні розрахунки ефективності систем гарячого водопостачання житлових будинків [5]. Авторами даної роботи визначено ексергії теплових потоків теплообмінних апаратів різного типу для підготовки гарячої води [6, 7].

**Формулювання цілей статті.** Метою роботи є дослідження ексергетичного коефіцієнта корисної дії (ЕККД) теплових мереж та систем опалення житлових будинків залежно від режиму роботи самої мережі та температури зовнішнього повітря.

**Основна частина.** Оцінка значень ЕККД проводилася на основі досліджень характеристик ексергії  $\epsilon$  (корисно використаної теплоти), Дж, та анергії  $a$  (безповоротно втраченої теплоти), Дж, у навколишньому середовищі. [8, 9, 10].

Значення анергії  $a$ , Дж, при передаванні однакової кількості теплоти  $q$ , Дж, від тіла з температурою  $T_z$ , К, до тіла з температурою  $T_x$ , К, ( $T_z > T_x$ ) і розсіюванні енергії в навколишнє середовище з температурою  $T_0$ , К, становить

$$a = q T_0 (T_x^{-1} - T_z^{-1}), \text{ Дж.} \quad (1)$$

Ексергетичний коефіцієнт корисної дії (ЕККД) у такому випадку для розрахунків має

наступний вигляд:

$$\beta_3 = 1 - \beta_2; \quad (7)$$

$$\eta_\epsilon = [1 + T_0 (T_x^{-1} - T_z^{-1})]^{-1}. \quad (2)$$

Частинні похідні  $\delta\eta_\epsilon/\delta T_x$  та  $\delta\eta_\epsilon/\delta T_z$  характеризуються залежностями:

$$\delta\eta_\epsilon/\delta T_x = T_0 T_x^{-2} [1 + T_0 (T_x^{-1} - T_z^{-1})]^{-2}, \text{ K}^{-1}. \quad (3)$$

$$\delta\eta_\epsilon/\delta T_z = -T_0 T_z^{-2} [1 + T_0 (T_x^{-1} - T_z^{-1})]^{-2}, \text{ K}^{-1}. \quad (4)$$

Аналіз частинних похідних (3) і (4) показує наступне. При фіксованому значенні  $T_z$ , К, похідна (3) завжди додатна, а тому при зростанні  $T_x$ , К, ексергетичний коефіцієнт  $\eta_\epsilon$  теж зростає. Частина похідної (4) при фіксованому значенні  $T_x$ , К, завжди від'ємна. В такому випадку при зростанні  $T_z$ , К, коефіцієнт  $\eta_\epsilon$  зменшується. У зв'язку з тим, що в залежність (2) входять значення  $T_x$  і  $T_z$ , К, які змінюються в певних інтервалах, а похідні (3) і (4) дають різний характер зміни  $\eta_\epsilon$ , остаточну зміну  $\eta_\epsilon$  необхідно досліджувати на конкретних вихідних даних.

У граничному випадку всі графіки регулювання температури  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ , К, в подавальному, зворотному та «опалювальному» теплопроводах, відповідно, перетинаються в точці з температурою зовнішнього повітря  $t_s = 20^\circ\text{C}$  ( $T_0 = 293$  К). Температури теплоносія  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , К, приймають однакове значення  $T_1 = T_2 = T_3 = T_0$ .

На основі загальної залежності (1) енергія  $a$ , Дж, дорівнює нулю відповідно до  $T_x = T_z = T_0$  і  $(T_x^{-1} - T_z^{-1}) = 0$ . При рівності температур термодинамічної системи температурі зовнішнього середовища відсутнє розсіювання теплової енергії, але при цьому відсутнє і саме явище передачі теплоти в термодинамічній системі.

Оцінка ексергетичної ефективності теплових мереж здійснювалась наступним чином. Кількість теплоти, Дж, яка передається від подавального трубопроводу з температурою  $\tau_1$ , К, до зворотного з температурою  $\tau_2$ , К, і від подавального до «опалювального» з температурою  $\tau_3$ , К, відповідно, будуть дорівнювати:

$$q_2 = q \beta_2, \text{ Дж}; \quad q_3 = q \beta_3, \text{ Дж}, \quad (5)$$

де  $q$  – загальна ексергія для теплової мережі, Дж;  $\beta_2$  і  $\beta_3$  – відношення надлишкової температури:

$$\beta_2 = (\tau_2 - t_i) / (\tau_1 - t_i); \quad (6)$$

$t_i = 20^\circ\text{C}$  – температура повітря в будівлі.

Енергія  $a_2$ , Дж, безповоротних втрат теплоти від зворотного теплопроводу до навколишнього середовища з температурою  $T_0 = t_s + 273$ , К, буде становити

$$a_2 = q \beta_2 T_0 (T_2^{-1} - T_1^{-1}), \text{ Дж}. \quad (8)$$

Енергія  $a_3$ , Дж, розсіювання при передачі теплоти «опалювального» теплопроводу з температурою  $T_3 = \tau_3 + 273$ , К, становитиме

$$a_3 = q \beta_3 T_0 (T_3^{-1} - T_1^{-1}), \text{ Дж}. \quad (9)$$

Ексергетичний коефіцієнт корисної дії  $\eta_\epsilon$  для теплових мереж характеризується загальним відношенням:

$$\eta_\epsilon = q / (q + a_2 + a_3). \quad (10)$$

З врахуванням залежностей (8), (9) і (10) отримана розрахункова формула:

$$\eta_\epsilon = [1 + \beta_2 T_0 (T_2^{-1} - T_1^{-1}) + \beta_3 T_0 (T_3^{-1} - T_1^{-1})]^{-1}. \quad (11)$$

У табл. 1. наведені розрахунки ЕККД для різних режимів регулювання теплового навантаження за: «нормальними» (опалювальними) графіками  $\eta_\epsilon$  та «підвищеними» графіками  $\eta_\epsilon'$ . Значення температури графіків регулювання для режимів

$$\tau_1/\tau_3/\tau_2 = 130^\circ\text{C}/95^\circ\text{C}/65^\circ\text{C} (403 \text{ К}/368 \text{ К}/338 \text{ К})$$

та

$$\tau_{1II}/\tau_3/\tau_{2II} = 130^\circ\text{C}/95^\circ\text{C}/56^\circ\text{C} (403 \text{ К}/368 \text{ К}/329 \text{ К})$$

взяті з посібника [11].

Для теплової мережі з режимом регулювання

$$\tau_1/\tau_3/\tau_2 = 150^\circ\text{C}/95^\circ\text{C}/70^\circ\text{C} (423 \text{ К}/368 \text{ К}/343 \text{ К})$$

та для

$$\tau_{1II}/\tau_3/\tau_{2II} = 150^\circ\text{C}/95^\circ\text{C}/53^\circ\text{C} (423 \text{ К}/368 \text{ К}/326 \text{ К})$$

дані взяті з розрахунків, що наведені в роботі [12].

Аналіз результатів розрахунків показує наступне.

Таблиця 1  
Результати розрахунків ексергетичного коефіцієнта корисної дії  $\eta_e$  (ЕККД) теплових мереж

$t_3, \text{ }^\circ\text{C}$	8	5	0	-10	-21
$T_0, \text{ K}$	281	278	273	263	252
$T_1, \text{ K}$	330	338	351	376	403
$T_2, \text{ K}$	313	316	322	333	338
$T_3, \text{ K}$	320	325	335	351	368
$\eta_e$	0,952	0,950	0,948	0,931	0,917
$T_{1л}, \text{ K}$	344	344	356	379	403
$T_{2л}, \text{ K}$	308	308	313	321	329
$T_{3л}, \text{ K}$	325	325	335	351	368
$\eta_e'$	0,941	0,941	0,936	0,928	0,921
$T_1, \text{ K}$	330	349	355	386	423
$T_2, \text{ K}$	310	315	320	330	343
$T_3, \text{ K}$	315	323	330	350	368
$\eta_e'$	0,958	0,943	0,935	0,919	0,902
$T_{1л}, \text{ K}$	350	350	360	388	423
$T_{2л}, \text{ K}$	306	306	309	317	326
$T_{3л}, \text{ K}$	323	323	330	350	368
$\eta_e$	0,927	0,927	0,924	0,916	0,900

Примітка: для графіків регулювання  $T_{1л} / T_{3л} / T_{2л}$ , К, розрахунки  $\eta_e$  проведені з урахування «зламів» графіків.

Функція (11) має спадний характер зі зростанням температури, К,  $T_1$  та  $T_3$  при зменшенні температури зовнішнього повітря  $T_0$ , К. Для режимів регулювання  $130 \text{ }^\circ\text{C} / 65 \text{ }^\circ\text{C}$  та  $150 \text{ }^\circ\text{C} / 70 \text{ }^\circ\text{C}$  при однакових значеннях  $T_0$ , К, значення ЕККД  $\eta_e$  суттєво не відрізняються. При зміні  $t_3$  у межах від мінус  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  до плюс  $8 \text{ }^\circ\text{C}$  в цілому  $0,902 < \eta_e < 0,962$ .

При регулюванні режимів теплопостачання за «підвищеними» графіками значення  $\eta_e'$  зменшується в порівнянні з  $\eta_e$  для «опалювальних» графіків. В цілому при зміні температури  $t_3$  від мінус  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  до плюс  $8 \text{ }^\circ\text{C}$   $0,90 < \eta_e' < 0,941$ . Зменшення  $\eta_e'$  у такому випадку пояснюється зменшенням температур  $T_{2л} < T_2$ , К, і збільшенням енергії  $a_2'$ , Дж, від зворотного теплопроводу.

Оцінка ексергетичної ефективності опалювальних систем виконана за наступною методикою. При наданні ексергії  $\varepsilon_0 = q_0$ , Дж, від подавального трубопроводу опалювальній системі енергія  $a_0$ , Дж, розсіювання через зворотний теплопровід буде рівною:

$$a_0 = q_0 \left[ 1 - \frac{\tau_{20} - t_i}{\tau_{30} - t_i} \right] T_0 (T_e^{-1} - T_3^{-1}), \quad (12)$$

де  $T_e = 273 + 20 = 293 \text{ K}$ , при температурі пові-

тря всередині житлового приміщення  $t_e = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

На основі загальної залежності для ЕККД  $\eta_e$  опалювальної системи:

$$\eta_0 = q_0 / (q_0 + a_0). \quad (13)$$

і значенні  $a_0$ , Дж, за виразом (12), отримана розрахункова залежність:

$$\eta_0 = [1 + \beta_0 T_0 (T_e^{-1} - T_3^{-1})]^{-1}, \quad (14)$$

де параметр  $\beta_0$  обчислюється за формулою:

$$\beta_0 = 1 - (\tau_{20} - 20) / (\tau_{30} - 20). \quad (15)$$

У табл. 2 наведені результати розрахунків ЕККД для опалювальних систем: при режимах регулювання за «опалювальними» графіками –  $\eta_0$ ; за «підвищеними» графіками –  $\eta_0'$ . Відповідні вихідні дані взяті з табл. 1.

Аналіз розрахунків, що наведені в табл. 2, показує наступне. Ексергетичні коефіцієнти корисної дії опалювальних систем вищі, за аналогічний параметр для теплових мереж ( $\eta_0 > \eta_e$ ,  $\eta_0' > \eta_e'$ ).

Таблиця 2  
Результати розрахунків ексергетичних коефіцієнтів корисної дії  $\eta_0$  та  $\eta_0'$  опалювальних систем

$t_3, \text{ }^\circ\text{C}$	8	5	0	-10	-21
$T_0, \text{ K}$	281	278	273	263	252
$T_2, \text{ K}$	313	216	322	333	338
$T_3, \text{ K}$	320	325	335	351	368
$\eta_0$	0,979	0,974	0,965	0,956	0,934
$T_{2л}, \text{ K}$	308	308	313	321	329
$T_{3л}, \text{ K}$	325	325	335	351	368
$\eta_0'$	0,952	0,952	0,942	0,928	0,916
$T_2, \text{ K}$	310	315	320	330	343
$T_3, \text{ K}$	315	323	330	350	368
$\eta_0$	0,983	0,977	0,972	0,951	0,942
$T_{2л}, \text{ K}$	306	306	300	317	326
$T_{3л}, \text{ K}$	323	323	330	350	368
$\eta_0'$	0,952	0,952	0,944	0,922	0,911

Отримана закономірність справедлива для аналогічних вихідних даних  $t_3$  у межах від мінус  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  до плюс  $8 \text{ }^\circ\text{C}$  та режимів регулювання  $\tau_1 / \tau_2$  і  $\tau_{1л} / \tau_{2л}$ , К. Це пояснюється тим, що в системі опалення не враховується енергія безповоротних втрат теплоти від подавального теплопроводу.

За характером зміни монотонності функція (14) теж спадає зі зростанням значень  $T_2$ ,  $T_{2л}$ , К,

(або є зростальною зі зміною температури зовнішнього повітря у зазначених межах). У цілому високі значення ЕККД в діапазоні від 0,934 до 0,962 і  $\eta_0'$  в діапазоні від 0,900 до 0,941 пояснюється тим, що при передачі теплоти термодинамічні системи не виконують механічної роботи.

**Висновки.** Ексергетичний ККД ідеальних теплових мереж змінюється в межах від 0,902 до 0,962 і більший для мереж, що працюють за «нормальними» (опалювальними) графіками. Збільшення значень ЕККД в такому випадку порівняно з мережами, що працюють за «підвищеними» графіками не перевищує 0,22...2,20%. Ексергетичний ККД опалювальних систем вищий за ЕККД теплових мереж на 1,2...1,8 % і за характером зміни подібний до зміни ЕККД теплових мереж: зі зменшенням температури зовнішнього повітря

значення

ЕККД також зменшуються. При середньорічній опалювальній температурі, що знаходиться в інтервалі  $t_{z, \text{в}} 1,0$  °С до 2,0 °С для теплових мереж бажано застосовувати «опалювальні» графіки регулювання. Підготовку гарячої води слід здійснювати в індивідуальних теплових пунктах із застосуванням електричних чи газових водонагрівачів або використання альтернативних видів теплової енергії.

**Перспективи подальших досліджень.** На підставі проведеного дослідження ексергетичного коефіцієнта корисної дії (ЕККД) теплових мереж із застосуванням отриманих розрахункових залежностей бажано було б оцінити анергію, Дж, безповоротних втрат при транспортуванні теплової енергії залежно від товщини теплової ізоляції та способів прокладання теплопроводів.

### Література

1. Громов Н. К., Шубин Е. П. Тепловые сети. Справочное пособие по проектированию. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – 376 с.
2. Сафонов А. П. Сборник задач по теплофикации и тепловым сетям. Учебное пособие для вузов. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 320 с.
3. Лабай В. Й. Залежність ексергетичного ККД кондиціонера від зміни температур тепло- та холодоносіїв / В. Й. Лабай // Нова тема. – 2008. – №2. – с. 27–28.
4. Задоянний О. В. Ексергетичні критерії при оцінці енергоощадності систем кондиціонування повітря будівель і споруд / О. В. Задоянний // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2014. – Вип. 17. – с. 3-9.
5. Малкін Е. С. Розрахунки енергетичної та ексергетичної ефективності систем гарячого водопостачання об'єктів житловокомунального сектора / Е. С. Малкін, Н. Є. Журавська // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2016. – Вип. 20. – с. 3-13.
6. Голишев О. М. Аналіз та розрахунки ексергетичного коефіцієнта корисної дії швидкісних водоводяних теплообмінників для гарячого водопостачання / О. М. Голишев, В. І. Деньгуб, В. А. Коновалюк // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2018. – Вип. 25. – с. 13-17.
7. Деньгуб В. І. Дослідження ексергії теплових потоків, що контактено змішуються / В. І. Деньгуб // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. науч. трудов. Серия: Безопасность жизнедеятельности / Придніпровська державна академія будівництва та архітектури. – 2018. – Вып. 105 – с. 199-203. DOI: 10.30838/P.SMM.2415.250918.201.152
8. Янтовский Е. И. Потоки энергии и эксергии. – Москва: Наука, 1988. – 144 с.
9. Эксергетические расчеты технических систем: справ. пособие / В. М. Бродянский, Г. П. Верхивкер, Я. Я. Карчев и др.; под ред. А. А. Долинского, В. М. Бродянского; Ин-т технической теплофизики АН УССР. – Киев: Наукова думка, 1991. – 360 с.
10. Техническая термодинамика / Под. ред. В. И. Крутова. – Москва: Машиностроение, 1991. – 384 с.
11. Ковальчук В. А. Теплопостачання: Навчальний посібник / В. А. Ковальчук, Т. С. Мацїева Т. С. – Рівне: НУВГП, 2013. – 300 с.
12. Єнін П. М. Теплопостачання: Навчальний посібник / П. М. Єнін, Н. А. Швачко. – Київ: Кондор, 2007. – 244 с.

### References

1. Gromov N.K., Shubin E.P. *Тепловыe сети. Справочное пособие по проектированию*. Energoatomizdat, 1988.
2. Safonov A. P. *Sbornik zadach po teplofikatsii i teplovym setiam*. Enernoatomizdat, 1985.
3. Labai V. Y. “Zalezhnist ekserhetychnoho KKD kondytsionera vid zminy temperatur teplo- ta kholodonosiiiv.” *Nova tema*, no. 2, 2008. pp. 27-28.
4. Zadoiannyi O. V. “Ekserhetychni kryterii pry otsyntsi enerhooshchadnosti system kondytsionuvannia povitria

budivel i sporud.” *Ventylatsiia, osvittlennia ta teplofazopostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 17, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2014, pp. 3-9.

5. Malkin E. S., Zhuravska N. Ye. “Rozrakhunky enerhetychnoi ta ekserhetychnoi efektyvnosti system hariachoho vodopostachannia ob'ektiv zhytlvokomunalnoho sektora.” *Ventylatsiia, osvittlennia ta teplofazopostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 20, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2016, pp. 3-13.

6. Holyshev O. M., Denhub V. I., Konovaliuk V. A. “Analiz ta rozrakhunky ekserhetychnoho koefitsiienta korysnoi dii shvydkisnykh vodovodianykh teploobminnykiv dlia hariachoho vodopostachannia.” *Ventylatsiia, osvittlennia ta teplofazopostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 25, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2018, pp. 13-17.

7. Denhub V. I. “Doslidzhennia ekserhii teplovykh potokiv, shcho kontaktno zmishuiutsia.” *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie: Sbornik nauchnykh trudov. Seriya: Bezopasnost zhyznedeiatelnosti*. Iss. 105, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2018. pp. 199-203. DOI: 10.30838/P.CMM.2415.250918.201.152

8. Yantovskii E. I. *Potoki energii i eksergii*. Nauka, 1988.

9. Brodianskii V. M., Verkhivker G. P., Karchev Ya. Ya. i dr. *Eksergeticheskie raschety tehnikeskih sistem*. Edited by Dolinskii A. A., Brodianskii V. M., Naukdif dumka, 1991.

10. *Tekhnicheskaia termodinamika*. Edited by Krutov V. I. Mashinostroenie, 1991.

11. Kovalchuk V. A., Matsyeva T. S. *Teplopostachannia*. National University of Water and Environmental Engineering, Rivne. 2013.

12. Yenin P. M. Shvachko N. A. *Teplopostachannia*. Kondor, 2007.

УДК 697.34(0.75):621.1.016.7

## Исследование эксергетического коэффициента полезного действия водяных тепловых сетей и систем отопления

В. І. Деньгуб<sup>1</sup>, В. А. Коновалюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доц. Криворожский технический университет, г. Кривой Рог, Украина, vitdengub@gmail.com

<sup>2</sup>к.т.н., доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, viktorija.konovalyuk@gmail.com

*Аннотация. Проведено исследование эффективности эксергии путём определения эксергетического коэффициента полезного действия (ЕКПД) в зависимости от режима работы тепловых сетей и температуры наружного воздуха на основе расчётов характеристик эксергии  $\epsilon$  (полезно использованной теплоты) и анергии  $a$  (безвозвратно потерянной теплоты) в окружающей среде. Получена расчётная формула для определения эксергетического коэффициента полезного действия  $\eta_e$  для тепловых сетей. Выполнены расчёты эксергетического коэффициента полезного действия для различных режимов регулирования тепловой нагрузки. Определено, что при регулировании режимов теплоснабжения по "повышенному" графику значения эксергетического коэффициента по сравнению с "отопительными" графиками уменьшается и находится в диапазоне 0,90...0,941. Также выполнена оценка эксергетической эффективности систем отопления жилых домов при режимах регулирования по "отопительному" и "повышенному" графикам регулирования. Определены эксергетические коэффициенты полезного действия отопительных систем, которые на 1,2...1,8 % превышают эксергетический коэффициент полезного действия тепловых сетей. Это объясняется тем, что в системе отопления не учитывается анергия безвозвратных потерь теплоты от подающего теплопровода. Приведены результаты расчётов эксергетического коэффициента полезного действия для отопительных систем: при режимах регулирования по «отопительным» графиками –  $\eta_0$ ; по «повышенным» графиками –  $\eta_0'$ . Доказано, что с уменьшением температуры наружного воздуха значения эксергетического коэффициента полезного действия также уменьшаются. Рекомендуется при среднегодовой отопительной температуре, находящейся в интервале от 1,0 до 2,0 °C для тепловых сетей применять "отопительные" графики регулирования.*

*Ключевые слова:* эксергетический КПД, тепловые сети, анергия, эксергетическая эффективность.

UDC 697.34(0.75):621.1.016.7

## Experimental Research of the Exergy Efficiency of Water Heat Networks and Heating Systems

V. Denhub<sup>1</sup>, V. Konovaliuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD, associate professor. Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, vitdengub@gmail.com

<sup>2</sup>PhD, associate professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine.  
viktorija.konovalyuk@gmail.com

*Abstract. A study of the exergy efficiency and a procedure for calculating the exergy efficiency has been carried out, depending on the conditions of operation of the heat supply networks and the temperature of the outside air, based on the definitions of the exergy characteristics  $\epsilon$  of the useful heat and anergy  $a$  - the irreversibly lost heat in the environment. The calculation formula for determining the exergy efficiency coefficient  $\eta_\epsilon$  for heat supply networks is obtained. Exergy efficiency calculations for different options of thermal load regulation are executed. The results of calculations of exergy efficiency coefficient  $\eta_\epsilon$  of heat supply networks are shown. It is determined that when adjusting the modes of heat supply for "high" temperature charts, the value of the exergy efficiency decreases in comparison with the "heating" charts and is in the range of 0,90...0,941. Also, an estimation of exergy efficiency of heating systems in residential buildings under the control regimes for "heating" and "elevated" chart has been performed. We obtain the dependence for definition of calculations heating systems. The exergy efficiency of heating systems, which is 1.2...1.8 % higher than the exergy efficiency of the heat supply networks, are determined. The exergy coefficients of the usefulness of the heating systems are higher, with the same parameter for heat supply networks. This is due to the fact that the heating system does not take into account the energy of irreversible heat losses from the supply pipeline. It is proved that with the decrease of the temperature of external air the value of exergy efficiency also decreases. It is recommended to use "heating" control schedules for heat supply networks at an average annual heating temperature, which is in the interval from 1.0 °C to 2.0 °C) for heat supply networks.*

*Keywords: exergy effectiveness, thermal networks, anergy, exergy efficiency.*

Надійшла до редакції / Received 05.02.2019