

УДК 338.5

Нікіфорович О. Є., аспірант (Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів), **Волощук В. А.,** к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ЕКСЕРГОЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІСЬКОГО РАЙОНУ

В роботі на основі ексергоекономічного аналізу запропоновано обґрунтування типу та деяких параметрів централізованої системи теплозабезпечення міського району. Показано, що в теперішніх умовах, у порівнянні із газовими котельнями, системи із використанням твердопаливних котелень або теплонасосних установок на стічних водах характеризуються нижчими сумарними ексергоекономічними затратами, що включають в себе інвестиційну складову та вартість деструкції ексергії. Методологія ексергоекономічного оцінювання вказує, що в перспективі саме теплонасосні установки є одними із найбільш доцільних у сфері теплозабезпечення через можливість подальшого зниження деструкції ексергії та вартості ексергетичних потоків. Технології, що базуються на спалюванні палива є найбільш неефективними у цій сфері.

Ключові слова: ексергоекономічний аналіз, система теплозабезпечення, міський район.

Існуюча в енергетиці методологія обґрунтування рішень, яка базується на першому законі термодинаміки та техніко-економічному обґрунтуванні, не забезпечує вирішення викликів сьогодення щодо необхідності підвищення енергоефективності при теплозабезпеченні населених пунктів. Сьогодні назріла нагальна проблема розробки, удосконалення та використання принципово нових методів прийняття рішень у сфері теплозабезпечення, які базуються на поєднанні першого та другого законів термодинаміки (методів ексергетичного/термодинамічного аналізу) із економічним та екологічним оцінюванням.

Ексергетичний підхід є новим витком в теорії створення систем теплозабезпечення будівель. Можливості суто енергетичного підходу до удосконалення таких систем майже вичерпані. На відміну від енергетичного аналізу поєднання ексергетичного, економічного та екологічного оцінювання в єдину методологічну базу дозволяє належним чином оцінити місце, значення, джерела, вартість та негатив-



вний вплив на довкілля термодинамічних втрат при передачі та перетворенні енергії [1; 2; 3].

На сьогоднішній день кількість наукових щорічних статей, присвячених методам створення та аналізу систем теплозабезпечення будівель чи населених пунктів з позицій ексергетичного підходу (низькоексергетичні системи теплозабезпечення), налічує вже сотні [3; 4; 5] та інші. Піонерними роботами при цьому вважаються статті японського вченого Шукуя (Shukuя) [3] двадцятирічної давності.

Огляд існуючих робіт показав, що ексергетичний аналіз систем теплозабезпечення реалізований, в основному, для окремо вибраних значень параметрів зовнішнього середовища [3; 4]. В деяких із них досліджуються ексергетичні характеристики при змінних параметрах довкілля [5]. Є роботи, де сумарно враховується динаміка зміни параметрів довкілля в межах типового метеорологічного року [6]. Хоча варто зауважити, що на сьогоднішній день не для всіх населених пунктів типові метеорологічні роки сформовані. Наприклад, для України тільки Київ та Одеса мають такі дані. Крім того, існує доцільність врахування мінливості параметрів і у багаторічному перерізі [7]. Теоретичне обґрунтування застосування саме динамічного підходу при реалізації методів ексергетичного аналізу наведено в роботі [7].

Разом з тим, підвищення термодинамічної ефективності при створенні нової або удосконалені існуючої системи теплозабезпечення на основі суто ексергетичного підходу не має практичного значення, якщо ці задачі не розглядаються сумісно із задачею мінімізації економічних затрат та негативного антропогенного впливу.

Перші спроби визначити вартість продукту системи на основі ексергетичного підходу були зроблені у 20-30-х роках минулого століття. При цьому, найчастіше робиться посилання на роботу американського вченого Кінана (Keenan) [1], де технічна роботоздатність (availability), яка потім була названа ексергією, використовувалась сумісно із економічними показниками для оцінки продукту, виробленого когенераційною установкою. Хоча, в деяких публікаціях щодо перших спроб поєднання ексергетичного та економічного оцінювання згадується робота Лотка (Lotka) [1]. Подальший розвиток цієї ідеї призвів до появи у 1960-х роках такого напрямку як термoeкономіка, а потім і ексергоeкономіки [1; 2].

Методи ексергоeкономічного аналізу є найбільш універсальними у застосуванні. Їх можна ефективно використовувати при оцінюванні та обґрунтуванні рішень у системах будь-якої складності.

Відносно незначна кількість робіт присвячена застосуванню методів ексергоeкономічного оцінювання систем теплозабезпечення.

Опубліковані праці пропонують результати такого аналізу на основі стаціонарного підходу [8; 9]. Але, знову ж таки, теоретичний аналіз та статистична обробка даних вказує про доцільність застосування динамічного підходу при реалізації ексергоекономічного оцінювання систем теплозабезпечення [7].

Метою роботи є обґрунтування типу та деяких параметрів централізованої системи теплозабезпечення міського масиву за допомогою методів ексергоекономічного аналізу.

Модель ексергоекономічного аналізу енергоперетворювальної системи складається із балансових рівнянь вартості та додаткових рівнянь [10]. Баланс вартості для k -го елементу системи показує, що сума вартостей, пов'язаних з усім процесом транспорту ексергії, дорівнює сумі вартостей всіх входів ексергії плюс вартість капітальних витрат Z_k^{CI} та витрат на обслуговування Z_k^{OM} [10]. Сума двох останніх величин позначається як Z_k .

Відповідно для k -го компоненту системи балансове рівняння вартості буде мати вигляд

$$\dot{C}_{P,k} = \dot{C}_{F,k} + \dot{Z}_k, \quad (1)$$

або

$$c_{P,k} \dot{E}_{P,k} = c_{F,k} \dot{E}_{F,k} + \dot{Z}_k, \quad (2)$$

де $\dot{C}_{P,k}$ та $\dot{C}_{F,k}$ – відповідно вартість ексергетичного потоку «продукту» та «палива»;

Z_k – сумарна вартість капітальних затрат, витрат на обслуговування (не включаючи затрати на паливо) та ремонт;

$c_{P,k}$ та $c_{F,k}$ – відповідно питома вартість ексергії «палива» та «продукту»;

$\dot{E}_{P,k}$ та $\dot{E}_{F,k}$ – відповідно ексергія потоку «палива» та «продукту» k -го компонента.

Критеріями ексергоекономічного аналізу k -го компонента системи виступають:

- питома вартість ексергії «палива»

$$c_{F,k} = \frac{\dot{C}_{F,k}}{\dot{E}_{F,k}}; \quad (3)$$

- питома вартість ексергії «продукту»

$$c_{P,k} = \frac{\dot{C}_{P,k}}{\dot{E}_{P,k}}; \quad (4)$$

- вартість, пов'язана з деструкцією ексергії

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \dot{E}_{D,k}; \quad (5)$$

- сумарна вартість капітальних затрат, витрат на обслуговування (не включаючи затрати на паливо) та ремонт

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM}; \quad (6)$$

- відносна зміна вартості ексергії «продукту»

$$r_k = \frac{c_{P,k} - c_{F,k}}{c_{F,k}}; \quad (7)$$

- ексергоекономічний фактор

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + c_{F,k} \dot{E}_{D,k}}. \quad (8)$$

В роботі пропонується реалізація ексергоекономічної моделі на основі динамічного підходу з подальшим визначенням річних характеристик (використовується верхній індекс *year*) і їх осереднення у багаторічному періоді.

Розглядається централізована система теплозабезпечення міського масиву (рис. 1) із трьома можливими типами джерел: газова котельня, твердопаливна котельня та теплонасосна установка (ТНУ) з утилізацією енергії стічних вод.

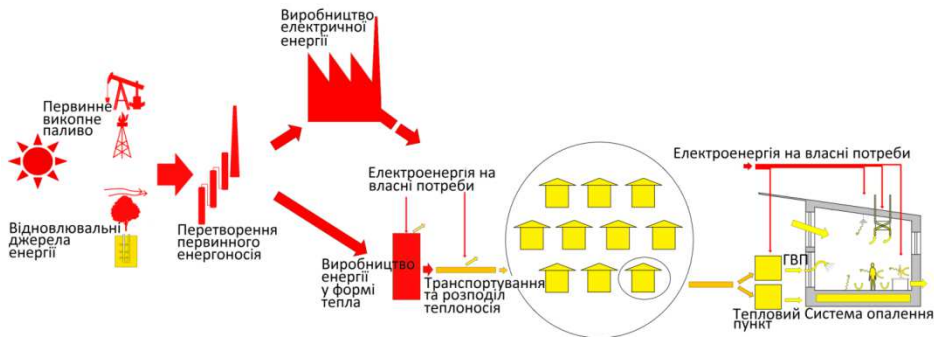


Рис. 1. Принципова розрахункова схема централізованої системи теплозабезпечення міського масиву

Для аналізу використанні метеорологічні дані для умов м. Рівне за 27 років, що включають себе середньодобові значення температури зовнішнього середовища, швидкості вітру та добове надходження сонячної радіації.

На рис. 2 наведена залежність річних сумарних ексергоекономічних затрат $Z^{year} + C_D^{year}$ централізованої системи теплозабезпечення від частки встановленої потужності твердопаливної котельні (а) та ТНУ (б) як базового джерела та співвідношення цін k на енер-

гоносії для базового та пікового (газова котельня) джерел. Як видно із рис. 2, при певних співвідношеннях цін k на енергоносії для базового та пікового (газова котельня) джерел, сумарні ексергоекономічні затрати $Z^{year} + C_D^{year}$ централізованої системи із використанням твердопаливної котельні та ТНУ на стічних водах є нижчими у порівнянні із газовою котельнею. Для джерела на основі твердопаливної котельні це має місце при відношенні цін на біопаливо та природний газ $k < 0,8$. При використанні ТНУ затрати $Z^{year} + C_D^{year}$ є меншими у порівнянні із джерелом на базі газової котельні при $k < 3$. Крім того, із рис. 2 бачимо, що при певних співвідношеннях цін k існує оптимальне значення встановленої потужності базового джерела, при якому сумарні ексергоекономічні затрати є мінімальними. Наприклад, у випадку використання твердопаливної котельні та $k = 0,5$, мінімальне значення затрат $Z^{year} + C_D^{year} = 3,3 \cdot 10^5$ євро/рік має місце при встановленій потужності даного джерела, рівній 50% від загальної встановленої теплової потужності. При застосуванні ТНУ та $k = 2$, мінімальне значення затрат $Z^{year} + C_D^{year} = 3,8 \cdot 10^5$ євро/рік також має місце при встановленій потужності даного джерела, близькому до значення 50% від загальної встановленої теплової потужності. Загалом, якщо й існує оптимальна встановлена потужність базового джерела, при якому сумарні ексергоекономічні затрати є мінімальними, то вони при умовах, що досліджуються, знаходиться на рівні 50% або нижче.

На рис. 3 наведена залежність ексергоекономічного фактора f централізованої системи теплозабезпечення міського масиву від частки встановленої потужності твердопаливної котельні (а) та ТНУ (б) як базового джерела та співвідношення цін k на енергоносії для базового та пікового джерел. Отже, із рис. 3 бачимо, що при співвідношеннях цін $k \leq 1$ для твердопаливної котельні та $k \leq 4$ для ТНУ ексергоекономічний фактор є більшим ніж при використанні газової котельні. Якщо для газової котельні значення цього фактора становить 10%, то для твердопаливної котельні або ТНУ маємо підвищення значення цього фактора до 20...75%. Варто зауважити, що для твердопаливної котельні та ТНУ ексергоекономічний фактор найбільш суттєво зростає при збільшенні встановленої потужності базового джерела до 50%. Ексергоекономічний фактор є показником, що визначає шляхи удосконалення системи або окремого елемента. Якщо значення цього параметра є відносно низьким, то це означає, що для підвищення ефективності елемента або системи необхідно знижувати деструкцію ексергії. Якщо ж значення ексергоекономічного фактора є відносно високим, то для подальшого удосконалення елемента або системи необхідно розглянути та проаналізувати рішення із



зниження інвестиційної складової. В даному випадку газова котельня характеризується найнижчим значенням ексергоекономічного фактора (10%). Але подальше підвищення цього параметра для даного типу джерела практично неможливе через застосування спалювання палива та передачі енергії від продуктів згорання до води системи теплозабезпечення. Для твердопаливної котельні також суттєвого зниження деструкції ексергії досягнути неможливо. Хоча значення ексергоекономічного фактора для цього джерела є вищим ніж для газової котельні через вищі питомі капіталовкладення. Що ж стосується ТНУ, то, як видно із рис. 3, б ексергоекономічний фактор даного типу джерела сягає значення 50...75%. Причиною цього є досить суттєві питомі капіталовкладення та зниження деструкції ексергії.

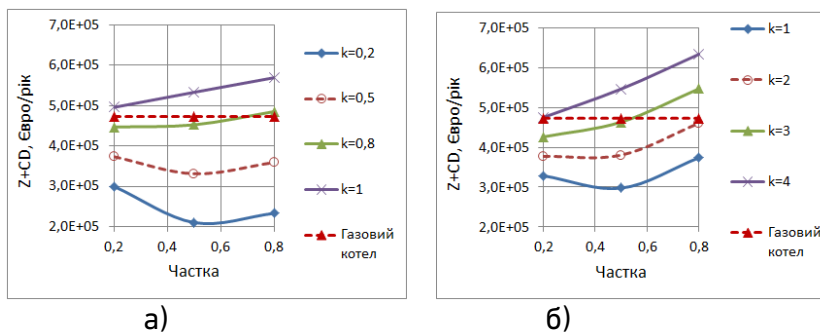


Рис. 2. Залежність осереднених у багаторічному перерізі річних сумарних ексергоекономічних затрат $Z^{year} + C_D^{year}$ централізованої системи теплозабезпечення від частки встановленої потужності твердопаливної котельні (а) та ТНУ (б) як базового джерела та співвідношення цін k на енергоносії для базового та пікового (газова котельня) джерел (вартість енергоносія для пікового джерела рівна 0,026 євро/(кВт·год)

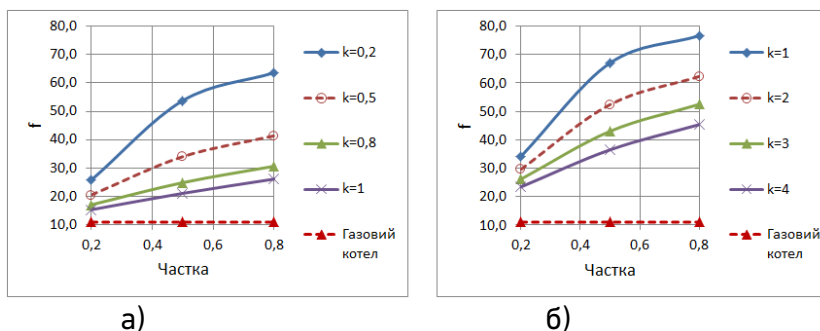


Рис. 3. Залежність осередненого у багаторічному перерізі ексергоекономічного фактора централізованої системи теплозабезпечення від частки встановленої потужності твердопаливної котельні (а) та ТНУ (б) як базового джерела та співвідношення цін k на енергоносії для базового та пікового (газова котельня) джерел (вартість енергоносія для пікового джерела рівна 0,026 євро/(кВт·год)

На рис. 4 наведена зміна питомої вартості ексергії енергетичного потоку в основних елементах системи централізованого теплозабезпечення із використанням трьох видів генераторів теплоти (ТНУ, твердопаливна та газова котельня). При використанні ТНУ та твердопаливної котельні 50% пікового навантаження покривається газовою котельнею. Бачимо, що питома вартість ексергії «продукту» (внутрішнє повітря з температурою 20° С) є значно вищою за вартість палива енергоресурсу, що споживається. При використанні газової котельні з питомою вартістю ексергії «палива» 0,026 євро/кВт·год маємо вартість ексергії «продукту», яка рівна 0,829 євро/кВт·год. Якщо для теплозабезпечення запропонувати твердопаливну котельню (в якості базового джерела), то при питомій вартості ексергії «палива» 0,021 євро/кВт·год питома вартість ексергії «продукту» становить 0,719 євро/кВт·год. При використанні ТНУ (в якості базового джерела) з питомою вартістю ексергії «палива» 0,043 євро/кВт·год маємо питому вартість ексергії «продукту» 0,693 євро/кВт·год. Отже, саме ТНУ забезпечує в даному випадку найменшу питому вартість ексергії «продукту».

Із рис. 4 бачимо, як зростає питома вартість ексергії «продукту» в основних елементах СТ. Найбільше зростання цієї вартості має місце у генераторі теплоти (рис. 5). При цьому, там, де використаний процес спалювання палива (газовий або твердопаливний котел) – процес із найбільшою деструкцією ексергії, якої практично позбутися неможливо – ріст питомої вартості ексергії потоку – найвищий (відповідно 720 та 870% згідно даних на рис. 5). Саме за рахунок того, що у ТНУ найменша деструкція ексергії при трансформації теплоти, ексергетична вартість зростає найменше – від 0,043 євро/кВт·год до 0,179 євро/кВт·год (або на 312% згідно даних на рис. 5).

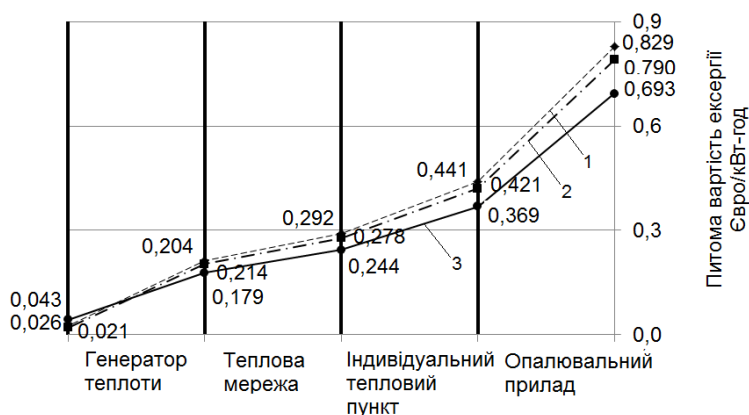


Рис. 4. Зміна питомої вартості ексергії енергетичного потоку у системі централізованого теплозабезпечення на основі трьох видів джерел енергії: 1 – газова котельня; 2 – твердопаливна котельня (покриває 50% встановленої потужності); 3 – ТНУ (покриває 50% встановленої потужності)

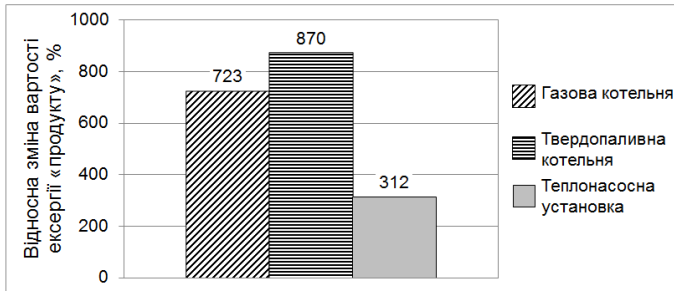


Рис. 5. Відносна зміна питомої вартості ексергії «продукту» газової котельні, твердопаливної котельні та ТНУ на стічних водах

Варто зауважити, що зміна питомої вартості ексергії «продукту» в інших елементах СТ буде однаковою для всіх запропонованих джерел теплоти.

Суттєве підвищення вартості ексергії енергетичного потоку має місце в індивідуальному тепловому пункті (при передачі теплоти від води системи тепlopостачання до води системи опалення будинку) та в опалювальному приладі (при передачі теплоти від води системи опалення будинку до внутрішнього повітря). Це обумовлено значними температурними напорами у цих теплообмінниках, та відповідною деструкцією ексергії. Якщо, наприклад, використати низькотемпературну систему опалення (для зниження деструкції ексергії в опалювальному приладі) у системі з газовим котлом, то вартість ексергії продукту не зменшиться. Оскільки, при цьому, зросте деструкція в індивідуальному тепловому пункті або у котлі. Якщо це зробити для ТНУ, то, за рахунок можливого зниження температури подавальної води в системі тепlopостачання, можна додатково знизити вартість ексергії продукту системи. Навіть якщо і врахувати, що ТНУ використовує електричну енергію, що генерується із ексергетичним ККД 30...40%, використання даної системи для теплозабезпечення є одним із найдоцільнішим у перспективі. Підвищення ексергетичної ефективності ТНУ (перехід на низькотемпературне теплозабезпечення, залучення високотемпературних джерел енергії тощо) забезпечить відповідне покращення ексергоекономічних характеристик системи.

Висновки:

1. Із використанням методології ексергоекономічного аналізу, на прикладі централізованого теплозабезпечення міського району в погодно-кліматичних умовах м. Рівне, виявлено, що при можливих на сьогоднішній день діапазонах цін на енергоносії та обладнання, існуючих тенденціях з підвищення теплотехнічних характеристик будинків, із трьох видів джерел теплозабезпечення (газова котельня, котельня на біопаливі та ТНУ на стічних водах) найбільш доціль-

но використовувати ТНУ. Це обумовлено тим, що у системах на базі ТНУ ексергетична вартість кінцевого «продукту» є на 8...18% нижча у порівнянні із найбільш поширеними на практиці технологіями (на базі котельень).

2. Саме через здатність методології ексергоекономічного аналізу оцінити та поєднати економічні та термодинамічні положення з самого початку аналізу, вдалося з'ясувати не тільки зовнішні, але і внутрішні, обумовлені термодинамічною недосконалістю елементів системи, фактори впливу на економічні характеристики. Показано ТНУ є одними із найбільш перспективних технологій сфері теплозабезпечення, оскільки характеризуються можливістю подальшого зниження ексергетичної вартості «продукту» системи через зниження деструкції ексергії. Технології, які базуються на безпосередньому спалюванні палива є одними із найбільш неефективних в перспективі.

1. Sciubba E. A brief Commented History of Exergy From the Beginnings to 2004 [Text] / E. Sciubba, G. Wall // International Journal of Exergy. – 2007. – Vol. 10, No. 1. – P. 1–26. 2. Tsatsaronis G. Comments on the Paper “A Brief Commented History of Exergy from the Beginnings to 2004” E. Sciubba and G. Wall Int. J. of Thermodynamics, 10 (2007), pp 1-26 and Authors’ Response / G. Tsatsaronis // International Journal of Exergy. – 2007. – Vol. 10, No. 4. – P. 187–192. 3. Hepbasli A. Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies [Text] / A. Hepbasli // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2012. – Vol. 16(1). – P. 73–104. 4. Tori’o H. Exergy analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings: A critical view [Text] / H. Tori’o, A. Angelotti, D. Schmidt // Energy and Buildings. – 2009. – Volume 41, Issue 3. – P. 248–271. 5. Tori’o H. Development of system concepts for improving the performance of a waste heat district heating network with exergy analysis [Text] / H. Tori’o, D. Schmidt // Energy and Buildings. – 2010. – Volume 42. – P. 1601–1609. 6. Zhou Y. Exergy analysis of the building heating and cooling system from the power plant to the building envelop with hourly variable reference state [Text] / Y. Zhou, G. Gong // Energy and Buildings. – 2013. – Volume 56. – P. 94–99. 7. Voloshchuk V. A. Effect of variation of operational regimes in building environment on results of its energy and exergy assesments / V. A. Voloshchuk // Civil and Environmental Engineering Reports. – 2017. – 24(1). – С. 145–158. 8. Baldvinsson I. A comparative exergy and exergoeconomic analysis of a residential heat supply system paradigm of Japan and local source based district heating system using SPECO (specific exergy cost) method [Text] / I. Baldvinsson, T. Nakata // Energy. – 2014. – Volume 74. – P. 537–554. 9. Bagdanavicius I. Assessment of community energy supply systems using energy, exergy and exergoeconomic analysis



[Text] / A. Bagdanavicius, N. Jenkins, G. P. Hammond // Energy. – 2012. – Volume 45. – P. 247–255. **10.** Bejan A. Thermal Design and Optimization / A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. Moran. – New York : Wiley, 1996. – 542 p.

Рецензент: д.т.н., професор Рябенко О. А. (НУВГП)

Nikiforovich O. Y., Post-graduate Student (Chernihiv National University of Technology, Chernigiv), **Voloshchuk V. A., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

EXERGOECONOMIC ANALYSIS OF COMMUNITY DISTRICT HEATING SYSTEM

Feasibility analysis of community district heating system is proposed using exergoeconomic approach. It is shown that in current conditions, compared to gas boilers, systems using biomass boilers or heat pump plants on sewage waters have lower total exergoeconomic costs, which consist of investment ones and costs of exergy destruction. The methodology of the exergoeconomic assessment indicates that in the long term perspective heat pump systems are among the most promising for HVAC because of the possibility of further reduction of exergy destruction and costs associated with exergy streams. The technologies based on direct combustion of fuels are among the most ineffective in this sphere.

Keywords: exergoeconomic analysis, community district heating system.

Никифорович А. Е., аспирант (Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов), **Волощук В. А., к.т.н., доцент** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ЭКСЕРГОЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОРОДСКОГО РАЙОНА

В работе на основе эксергоэкономического анализа, предложено обоснование типа и некоторых параметров централизованной сис-

темы теплоснабжения городского района. Показано, что в нынешних условиях, по сравнению с газовыми котельными, системы с использованием твердотопливных котельных или теплонасосных установок на сточных водах характеризуются низким суммарным эксергоэкономическими затратами, включающих в себя инвестиционную составляющую и стоимость деструкции эксергии. Методология эксергоэкономической оценки указывает, что в перспективе, именно теплонасосные установки являются одними из наиболее перспективными в сфере теплообеспечения из-за возможности дальнейшего снижения деструкции эксергии и стоимости эксергетических потоков. Технологии, которые базируются на непосредственном сжигании топлива является наиболее неэффективными в этой сфере.

***Ключевые слова:* эксергоэкономический анализ, система теплообеспечения, городской массив.**
