

## ЕКСЕРГОЕКОНОМІЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІСЬКОГО РАЙОНУ З УРАХУВАННЯМ ПІДВИЩЕННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУДІВЕЛЬ

### EXERGOECONOMIC ANALYSIS OF COMMUNITY DISTRICT HEATING SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT IMPROVING ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS

*В роботі, на основі ексергоекономічного аналізу, запропоновано обґрунтування типу та деяких параметрів централізованої системи теплозабезпечення міського району. Разом із доцільністю переходу на теплозабезпечення від ТНУ як найбільш досконалої з енергетичної та економічної точок зору технології показано, що доцільність одночасного підвищення теплотехнічних характеристик будівель залежить від співвідношення цін  $k$  на енергоносії для базового (ТНУ) та пікового (газова котельня) джерел. При базовій ціні природного газу 0,026 Євро/(кВт·год) та відносно низьких значеннях співвідношення цін на енергоносії  $k$  (для твердопаливної котельні це має місце при  $k < 0,6$ , а для ТНУ – при  $k < 2,3$ ), сумарні річні ексергоекономічні затрати рішення без підвищення енергоефективності будівель є нижчими за рішення із одночасним підвищенням енергоефективності будівель. При  $k > 0,6$  для твердопаливної котельні та  $k > 2,3$  для ТНУ рішення з влаштування цих джерел теплоти із одночасним підвищенням теплотехнічних характеристик будівель є вже більш доцільними через нижчі сумарні ексергоекономічні затрати.*

**Ключові слова:** ексергоекономічний аналіз, система теплозабезпечення, міський район, підвищення енергоефективності будівель.

*В работе на основе эксергоекономического анализа, предложено обоснование типа и некоторых параметров централизованной системы теплоснабжения городского района. Вместе с целесообразностью перехода на тепло от ТНУ как наиболее совершенной с энергетической и экономической точек зрения технологии показано, что целесообразность одновременного повышения теплотехнических характеристик зданий зависит от соотношения цен  $k$  на энергоносители для базового (ТНУ) и пикового (газовая котельня) источников. При базовой*

*цене природного газа 0,026 евро / (кВт · ч) и относительно низких значениях соотношения цен на энергоносители  $k$  (для твердопаливної котельної это имеет место при  $k < 0,6$ , а для ТНУ - при  $k < 2,3$ ), суммарные годовые эксергоекономични затраты решение без повышения энергоэффективности зданий является ниже решения по одновременным повышением энергоэффективности зданий. При  $k > 0,6$  для твердопаливної котельної и  $k > 2,3$  для ТНУ решения по устройству этих источников теплоты с одновременным повышением теплотехнических характеристик зданий является уже более целесообразными через ниже суммарные эксергоекономични затраты.*

**Ключевые слова:** эксергоекономичний аналіз, система теплоснабження, городской район, повышение энергоэффективности зданий.

*Feasibility analysis of community district heating system is proposed using exergoeconomic approach. It is shown that heat pump technologies are the most promising ones from energetic and economic points of view. Simultaneous improvement of energy performance of buildings can be reasonable for some range of price ratio of fuels for base (heat pump plant) and peak (gas boiler) heat generators  $k$ . For price of natural gas 0,026 Euro/rW-hr and comparatively low price ratio ( $k < 0,6$  for the biomass boiler and  $k < 2,3$  for the heat pump plant) the total exergoeconomic costs of cases without improvement of energy performance of buildings are lower compared to cases with increased energy performance of buildings. When  $k > 0,6$  for the biomass boiler and  $k > 2,3$  for the heat pump plant it is reasonable to implement such heat generators with simultaneous improvement of energy performance of buildings because of lower exergoeconomic costs.*

**Key words:** exergoeconomic analysis, community district heating system, improvement of energy performance of buildings.

УДК 338.001.36

**Нікіфорович О.Є.**

аспірант

Чернігівський національний технологічний університет

**Постановка проблеми.** 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 негативний вплив на довкілля термодинамічних втрат при передачі та перетворенні енергії [1, 2, 3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розвиток ідеї поєднання ексергетичного аналізу із економічним оцінюванням призвів до появи у 1960-х

роках такого напряму як термoeкономіка, а потім і ексергоекономіки [1, 3]. Методи ексергоекономічного 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 ексергоекономічного оцінювання систем теплозабезпечення. Опубліковані праці пропонують результати такого аналізу на основі стаціонарного підходу [4, 5]. Теоретичний аналіз та статистична обробка даних вказує, що при реалізації ексергоекономічного оцінювання є доцільність врахування зміни режимів роботи системи теплозабезпечення впродовж розрахункового періоду [6].

В роботі [7], на основі застосування квазістаціонарного підходу для врахування змінних режимів роботи системи, за допомогою сезонних характеристик реалізовано ексергоекономічне обґрунтування типу та 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 доцільними 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.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є аналіз впливу існуючих тенденцій із підвищення енергоефективності в будинках на параметри ексергоекономічного оцінювання типів централізованої системи теплозабезпечення.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Модель ексергоекономічного аналізу енергоперетворювальної системи складається із балансових рівнянь вартості та додаткових рівнянь [3]. Баланс вартості для k-го елемента 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  $Z_k^{OM}$  [3]. 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 компоненту.

Критеріями ексергоекономічного аналізу k-го компоненту 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

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

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.

Для аналізу використані метеорологічні дані для умов м. Рівне за 27 років, що включають себе середньодобові значення температури зовніш-

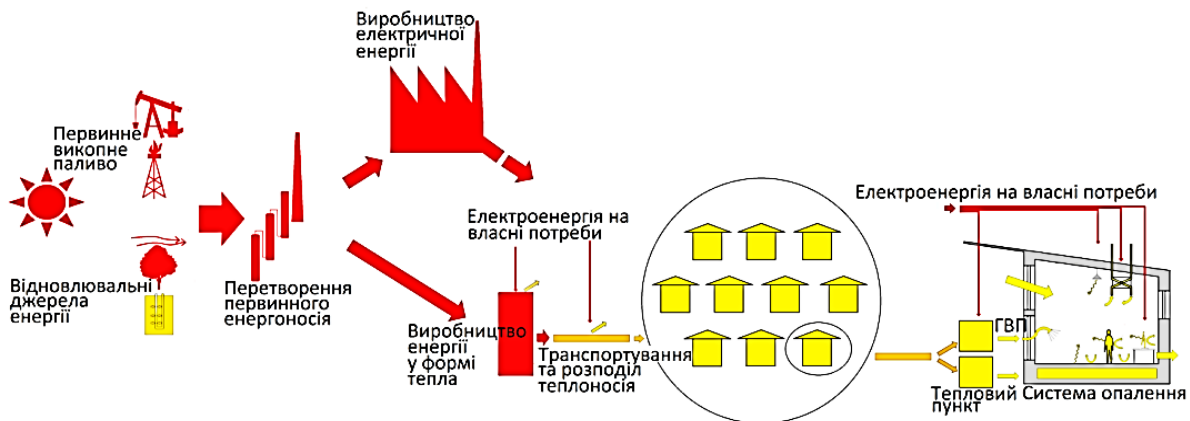


Рис. 1. Принципова розрахункова схема централізованої системи теплозабезпечення міського масиву

нього середовища, швидкості вітру та добове надходження сонячної радіації.

Теплотехнічні параметри будинків змінені таким чином: осереднене значення приведенного опору теплопередачі непрозорих огорожень збільшені від 1,2 до 3,0 (м<sup>2</sup>·К)/Вт; значення приведенного опору теплопередачі прозорих огорожень – від 0,5 до 0,7 (м<sup>2</sup>·К)/Вт; коефіцієнт пропускання сонячної енергії прозорими огороженнями збільшено від 0,4 до 0,6.

В результаті розрахунку теплова потужність централізованої системи теплозабезпечення, що аналізується, знизилася від 5330 кВт до 3524 кВт, питома теплова потужність – від 133 Вт/м<sup>2</sup> до 62 Вт/м<sup>2</sup>, а значення питомих потреб енергії на опалення та вентиляцію району – від 195 кВт·год/м<sup>2</sup> до 88 кВт·год/м<sup>2</sup>.

При реалізації ексергоекономічної моделі даного варіанту враховувалися додаткові інвестиції у підвищення теплотехнічних характеристик будівель. Дані інвестиції віднесені до кінцевого елемента технологічного процесу із теплозабезпечення – опалювальний прилад.

На рис. 2 наведена залежність річних сумарних ексергоекономічних затрат  $Z^{year} + C_D^{year}$  централізованої системи теплозабезпечення житлового масиву будинків із низькими теплотехнічними характеристиками 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. 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 існує оптимальна встановлена потужність базового джерела, при якому сумарні ексергоекономічні затрати є мінімальними, то вони при умовах, що досліджуються, знаходяться на рівні 50% або нижче.

Графіки залежності сумарних за рік затрат  $Z^{year} + C_D^{year}$  централізованої системи теплозабезпечення житлового масиву будинків із підвищеними теплотехнічними характеристиками 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 наведені на рис. 3.

Отже, із рис. 3 аналогічно як і для даних на рис. 2, бачимо, що при певних співвідношеннях цін  $k$  на енергоносії для базового та пікового

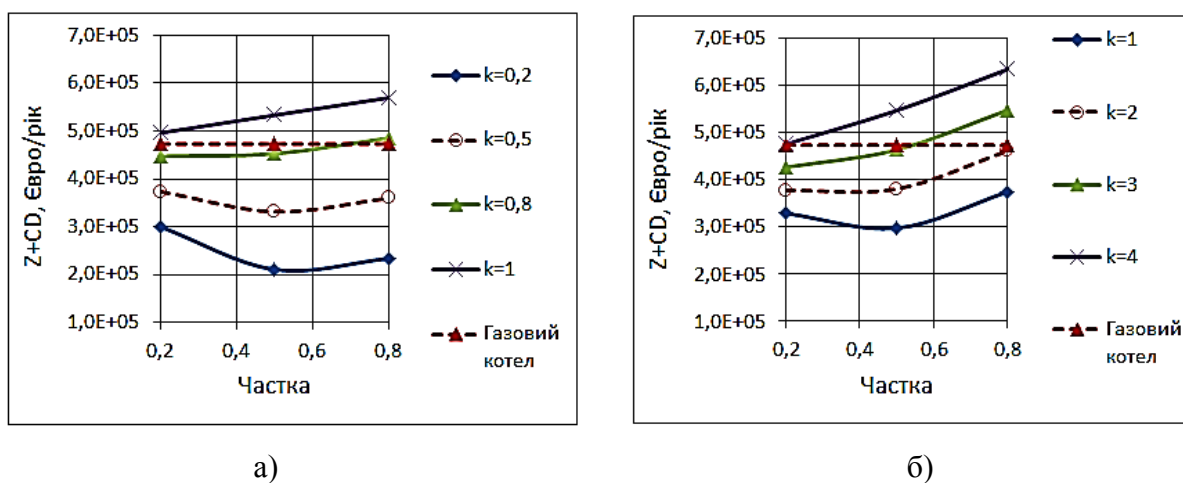


Рис. 2. Залежність осереднених річних сумарних затрат  $Z^{year} + C_D^{year}$  централізованої системи теплозабезпечення житлового масиву будинків із низькими теплотехнічними характеристиками від частки встановленої потужності твердопаливної котельні (а) та ТНУ (б) як базового джерела та співвідношення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

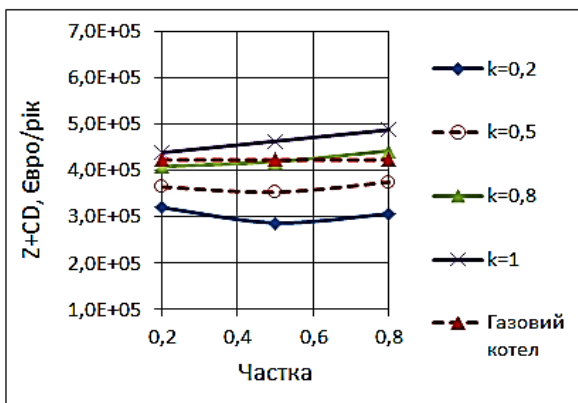
джерел сумарні за рік ексергоекономічні затрати  $Z^{year} + C_D^{year}$  для системи на основі твердопаливної котельні (а) та ТНУ (б) є меншими за сумарні затрати  $Z^{year} + C_D^{year}$  централізованої системи із використанням газової котельні. Чим менше значення відносного коефіцієнта  $k$ , який рівний відношенню цін на паливо базового джерела до цін на паливо пікового джерела енергії, тим нижчі річні ексергоекономічні затрати  $Z^{year} + C_D^{year}$ . Наприклад, при  $k=0,2\dots0,8$  значення  $Z^{year} + C_D^{year}$  для твердопаливної котельні є нижчим ніж для газової котельні. Хоча, якщо  $k=0,8$ , то при встановленій потужності котельні на біопаливі більше 50 % річні ексергоекономічні затрати  $Z^{year} + C_D^{year}$  є уже більшими ніж для газової котельні. У випадку ТНУ при  $k=1,0\dots3,0$  значення  $Z^{year} + C_D^{year}$  є нижчим ніж для газової котельні. Хоча, аналогічно, як і для твердопаливної котельні, при  $k=3,0$  та встановленій потужності ТНУ більше 50 % річні ексергоекономічні затрати  $Z^{year} + C_D^{year}$  є уже більшими ніж для газової котельні.

Якщо порівняти дані на рис. 2 та 3, то можна зробити висновок, що у другому варіанті для твердопаливної котельні із  $k=0,2$  сумарні ексергоекономічні затрати  $Z^{year} + C_D^{year}$  системи є на 7...36 % є вищими ніж у першому. При  $k=0,5\dots1$  затрати  $Z^{year} + C_D^{year}$  у другому варіанті уже знижуються до 15 % у порівнянні із першим. Аналогічно, при використанні ТНУ із співвідношенням цін  $k=1,0$  сумарні ексергоекономічні затрати  $Z^{year} + C_D^{year}$  системи без підвищення теплотехнічних характеристик будівель є на 4...16 % нижчими у порівнянні із системою, де передбачено додатково підвищення енергоефективності будівель. Але уже при

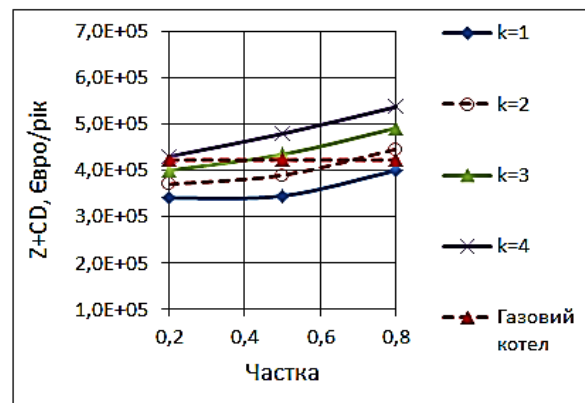
$k=2,0\dots4,0$  затрати  $Z^{year} + C_D^{year}$  системи теплозабезпечення будівель із підвищеними теплотехнічними характеристиками є до 15 % нижчими у порівнянні із системою, де додаткові інвестиції у підвищення теплотехнічних характеристик будівель не передбачені.

Отже, бачимо, для одного діапазону цін на енергоносії підвищення теплотехнічних характеристик будівель спричиняє збільшення сумарних ексергоекономічних затрат  $Z^{year} + C_D^{year}$ , а для іншого, навпаки – зниження. Підвищення теплотехнічних характеристик будівель супроводжується додатковими інвестиціями. Але, з іншої сторони, по-перше, знижується встановлена потужність і відповідно інвестиційна складова джерел теплоти, а, по-друге, зменшується сезонне споживання енергії, та пов'язана із ним сезонна деструкція ексергії. Покращення теплоізоляційних характеристик будівлі сприяє зниженню температурного рівня системи теплозабезпечення при незмінних її конструктивних характеристиках [8]. У свою чергу, пониження температури подавальної та зворотної мережі сприяє підвищенню ексергетичної ефективності ТНУ і, як наслідок, також коефіцієнта трансформації. Зниження температури теплоносія системи теплозабезпечення практично не впливає на зміну ефективності (як енергетичної так і ексергетичної) твердопаливної чи газової котельні. Бачимо, що, при заданій вартості на первинні енергоносії, підвищення енергоефективності будівель є доцільним тоді, коли спричинене цим рішенням зростання інвестиційної складової є меншим за зниження деструкції ексергії.

На рис. 4 наведені графіки зміни річних сумарних затрат  $Z^{year} + C_D^{year}$  централізованої системи теплозабезпечення житлового масиву будинків без підвищення та із одночасним підвищенням

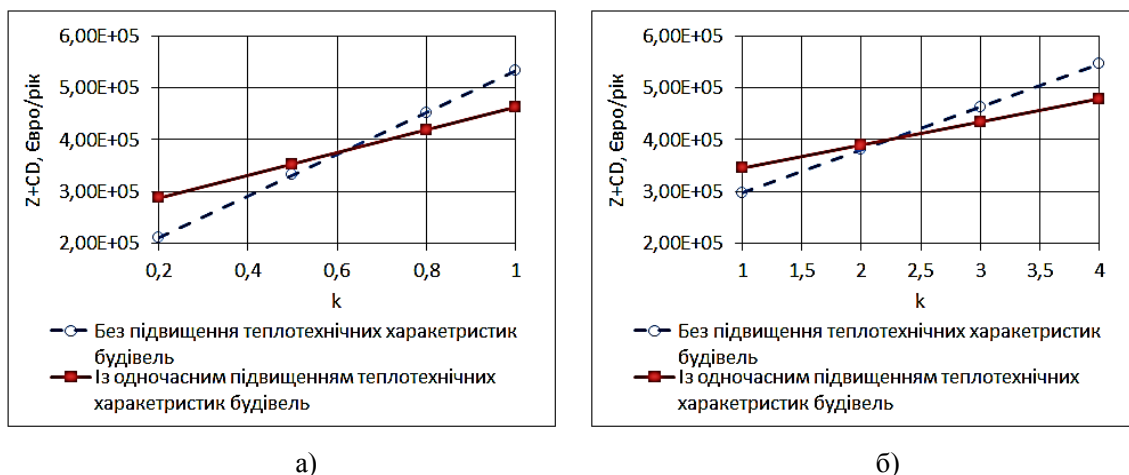


а)



б)

Рис. 3. Залежність осереднених річних сумарних затрат  $Z^{year} + C_D^{year}$  централізованої системи теплозабезпечення житлового масиву будинків із підвищеними теплотехнічними характеристиками 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. 4.** Графіки зміни річних сумарних затрат  $Z^{year} + C_D^{year}$  централізованої системи теплозабезпечення житлового масиву будинків без підвищення та із одночасним підвищенням теплотехнічних характеристик при відповідному значенні співвідношення цін  $k$  на енергоносії для базового (твердопаливна котельня та ТНУ відповідно) та пікового (газова котельня) джерел

теплотехнічних характеристик при відповідному значенні співвідношення цін  $k$  на енергоносії для базового (твердопаливна котельня та ТНУ відповідно) та пікового (газова котельня) джерел. Вартість енергоносія для пікового джерела рівна  $0,026$  Євро/(кВт·год). Частка встановленої потужності базового джерела рівна  $50\%$ .

Отже, із рис. 4 бачимо, що при менших значеннях співвідношення цін на енергоносії  $k$ , сумарні річні ексергоекономічні затрати рішення без підвищення енергоефективності будівель є нижчими за рішення із одночасним підвищенням енергоефективності будівель (для твердопаливної котельні це має місце при  $k < 0,6$ , а для ТНУ – при  $k < 2,3$ ). Із даних, наведених на рис. 4, можна зробити висновки, що при одночасному із встановленням джерела теплоти підвищенні теплотехнічних характеристик будівель зростання інвестиційної складової може бути меншим за зниження вартості деструкції ексергії. В результаті, при  $k > 0,6$  для твердопаливної котельні та  $k > 2,3$  для ТНУ рішення з влаштування цих джерел теплоти із одночасним підвищенням теплотехнічних характеристик будівель характеризуються нижчими сумарними ексергоекономічними затратами за рішення без одночасного підвищення енергетичної ефективності будівель. Точка перетину ліній із зміни річних сумарних затрат  $Z^{year} + C_D^{year}$  централізованої системи теплозабезпечення житлового масиву будинків без підвищення та із одночасним підвищенням теплотехнічних характеристик (див. рис. 4) характеризує співрозмірність рішень.

**Висновки з проведеного дослідження:**

1. Виконаний аналіз впливу існуючих тенденцій із підвищення енергоефективності в будинках на параметри ексергоекономічного оцінювання для трьох видів джерел теплозабезпечення міського району (газова котельня, котельня на біопаливі

та ТНУ на стічних водах) в погодно-кліматичних умовах м. Рівне.

2. Разом із доцільністю переходу на теплозабезпечення від ТНУ як найбільш досконалої як з енергетичної так із економічної точок зору технології показано, що доцільність одночасного підвищення теплотехнічних характеристик будівель залежить від співвідношення цін  $k$  на енергоносії для базового (ТНУ) та пікового (газова котельня) джерел.

3. При базовій ціні природного газу  $0,026$  Євро/(кВт·год) та відносно низьких значеннях співвідношення цін на енергоносії  $k$  (для твердопаливної котельні це має місце при  $k < 0,6$ , а для ТНУ – при  $k < 2,3$ ), сумарні річні ексергоекономічні затрати для рішення без підвищення енергоефективності будівель є нижчими за рішення із одночасним підвищенням енергоефективності будівель. При  $k > 0,6$  для твердопаливної котельні та  $k > 2,3$  для ТНУ влаштування цих джерел теплоти із одночасним підвищенням теплотехнічних характеристик будівель є вже більш доцільними через нижчі сумарні ексергоекономічні затрати. Це обумовлено меншим зростанням інвестиційної складової у порівнянні із зниженням вартості деструкції ексергії.

**БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:**

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. 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.
2. 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.

3. Bejan A. Thermal Design and Optimization / A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. Moran. – New York: Wiley, 1996. – 542 p

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Нікіфорович О.Є. Ексергоекономічний аналіз централізованої системи теплозабезпечення міського району / О.Є. Нікіфорович, В.А. Волощук // Вісник національного університету водного господарства та природокористування. Серія «Економічні науки». – 2017. – 2(78). – С. 42–52.

8. Жовмир Н.М. Низкотемпературные режимы систем отопления как предпосылка эффективного применения конденсационных отопительных котлов и тепловых насосов / Н.М. Жовмир // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т 30. – №5. – с.62-68.