

УДК 697.32:621.18

Дмитроченкова Е.І., Монах С.І., к.т.н., Орлов С.М., к.т.н.

Донбаська національна академія будівництва та архітектури, м. Макіївка

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СПІЛЬНОЇ РОБОТИ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ ТА КОТЛОАГРЕГАТУ НА ТВЕРДОМУ ПАЛИВІ

*Запропоновано два варіанти схем спільної роботи когенераційної установки на базі ДВС і твердопаливного котлоагрегату. Описано принцип роботи кожної з них. Наведено методику визначення ексергетичного ККД, відповідно до якої визначена ефективність роботи кожної схеми.*

### **Постановка проблеми**

Впровадження комбінованого виробництва теплової й електричної енергії (когенерації) є одним з основних заходів, спрямованих на економію енергоресурсів, викладених в «Галузевій програмі енергоефективності й енергозбереження в житлово-комунальному господарстві на 2010-2014 рр.», розробленої Міністерством з питань житлово-комунального господарства [1]. При цьому представляється актуальним дослідження спільної роботи когенераційних установок (КУ) і котлоагрегатів різної потужності, що працюють на твердому паливі. Отже, стає проблема вибору схеми їхньої спільної роботи. Одним із критеріїв вибору будь-якої установки, що спалює паливо, є ефективність використання в ній енергетичних ресурсів.

### **Ціль статті й формулювання завдання досліджень**

Дана робота присвячена визначенню ексергетичного ККД розроблених схем спільної роботи КУ на базі ДВЗ і котлоагрегату на твердому паливі.

### **Виклад основного матеріалу досліджень**

Для розгляду спільної роботи в комплексі з опалювальним агрегатом пропонується когенераційна установка, блокова конструкція якої містить у собі: двигун внутрішнього згоряння ТМЗ-8435.10, генератор електричного струму МЕ-200-4, теплообмінний апарат системи охолодження двигуна й теплообмінний апарат утилізації теплоти продуктів згоряння. Даний комплекс дозволить як виробляти власну електричну енергію, яка може бути використана на власні потреби котельні, так і додатково підігрівати мережну воду перед входом у котлоагрегат.

Принципові схеми роботи комплексу «КУ-котлоагрегат» зображені на рис. 1.

У схемі 1 вода зі зворотної системи теплопостачання після проходження лінії рециркуляції досягає необхідних параметрів, рекомендованих виробником котлоагрегату на вході в нього. Після цього частина мережної води (розрахована при проектуванні) підігривається в когенераційній установці, проходячи по черзі через теплообмінні апарати системи охолодження двигуна й утилізації теплоти димових газів. Потім вона змішується з кількістю мережної води, що залишилась, тим самим підвищуючи її температуру, і подається в котлоагрегат для подальшого підігріву. При цьому димові гази ДВЗ надходять у димар і видаляються в атмосферу.

Схема 2 від схеми 1 відрізняється тим, що димові гази ДВЗ не видаляються в атмосферу, а подаються в топкову камеру котлоагрегату. Додаткове підведення теплоти в камеру згоряння дозволяє зменшити витрату палива на підігрів мережної води.

У розроблених схемах пропонується використовувати котлоагрегат КВм(а)-0,8 МВт заводу «КРИГЕР» (м. Житомир, Україна).

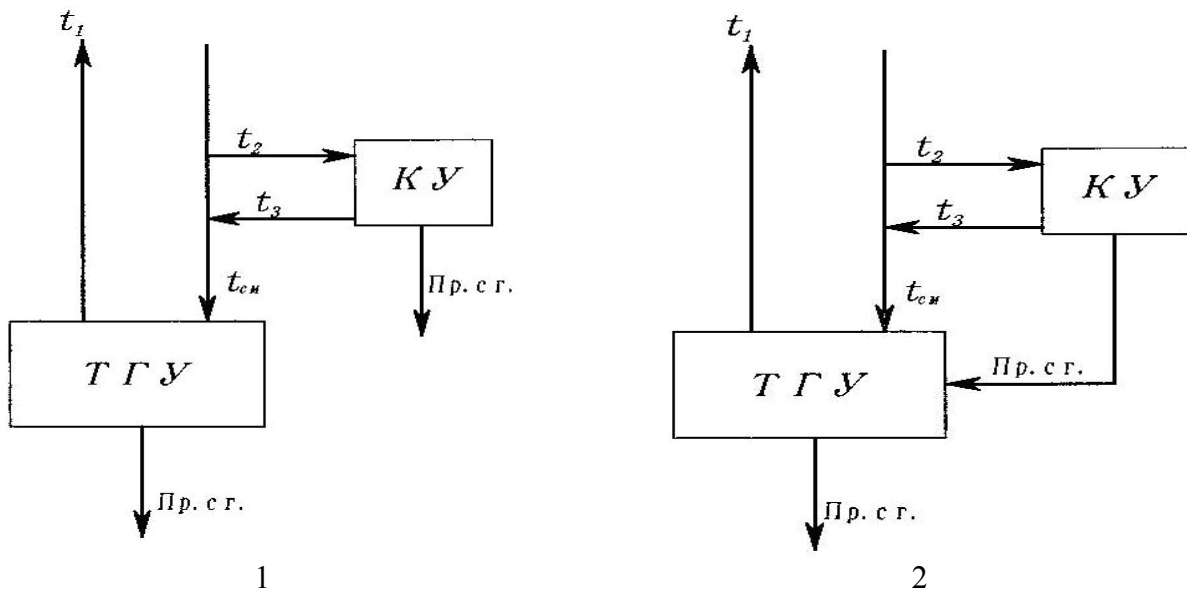


Рис. 1. Принципові схеми роботи комплексу «КУ-котлоагрегат»

У якості палива для двигуна внутрішнього згоряння використовується дизельне паливо, а для котлоагрегату – вугілля марки ЖР Донецького вугільного басейну.

Вихідні дані для проведення розрахунків представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

## Вихідні дані для ексергетичних розрахунків

Параметр	Позначення	Одиниці виміру	Схема 1	Схема 2
Температура навколишнього середовища	$t_0$	$^{\circ}\text{C}$	20	20
Температура води на вході в КУ (зі зворотної системи теплопостачання)	$t_2$	$^{\circ}\text{C}$	60	60
Температура води на виході з КУ	$t_3$	$^{\circ}\text{C}$	70	70
Температура води на вході в котлоагрегат	$t_{\text{cm}}$	$^{\circ}\text{C}$	61,5	61,5
Температура води на виході з котлоагрегату	$t_1$	$^{\circ}\text{C}$	85	85
Витрата палива в котлоагрегаті	$B$	кг/год	143,98	136,84
Витрата палива у ДВС	$B_{\text{ДВС}}$	кг/год	66	66
Витрата води через котлоагрегат	$G_{\text{ТГУ}}$	кг/год	28200	28200
Витрата води через КУ	$G_{\text{КУ}}$	кг/год	5040	5040
Вища теплота згоряння дизельного палива	$Q_{\text{pж}}^B$	кДж/кг	45408	45408
Вища теплота згоряння твердого палива (вугілля)	$Q_{\text{pг}}^B$	кДж/кг	34387	34387
Витрата вологого повітря, що подається в камеру згоряння котлоагрегата	$V_{\text{ВВ}}$	$\text{м}^3/\text{с}$	0,314	0,325

Для проведення ексергетичного аналізу й наступного визначення ексергетичного ККД технічної системи визначається «ексергія палива»  $E_{F,\text{tot}}$  і «ексергія продукту»  $E_{P,\text{tot}}$  [2]. На підставі цього ексергетична ефективність системи може бути визначена зі співвідношення:

$$\eta_{\text{e}} = \frac{\Sigma E_{\text{P}}}{E_{F,\text{tot}}} \quad (1)$$

Для кожної з розглянутих систем «КУ-котлоагрегат» складені поверхні із вказівкою потоків ексергії, які представлені на рис.2.

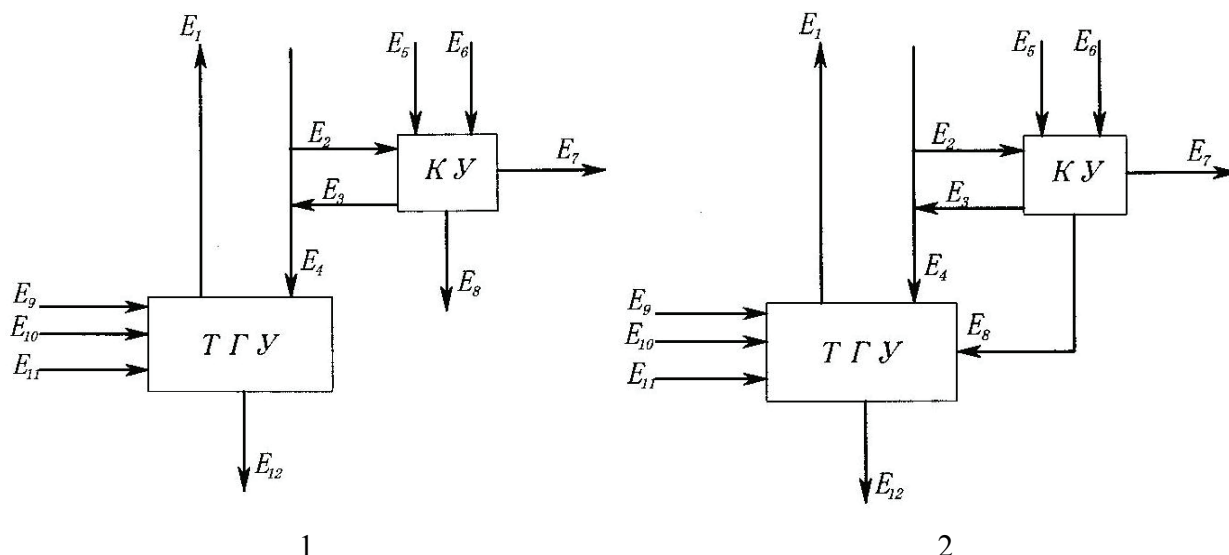


Рис. 2. Поверхні систем «КУ-котлоагрегат»

$E_1$  – ексергія води на виході з теплогенератора при  $t_1$ ;  $E_2$  – ексергія води на вході в КУ при  $t_2$ ;  $E_3$  – ексергія води на виході з КУ при  $t_3$ ;  $E_4$  – ексергія води на вході в теплогенератор при  $t_{cm}$ ;  $E_5$  – ексергія дизельного палива для спалювання у ДВЗ;  $E_6$  – ексергія вологого повітря для спалювання дизельного палива;  $E_7$  – ексергія виробленої електричної енергії;  $E_8$  – ексергія продуктів згоряння на виході з КУ;  $E_9$  – ексергія твердого палива для спалювання в теплогенераторі;  $E_{10}$  – ексергія вологого повітря для повного спалювання твердого палива;  $E_{11}$  – ексергія електричної енергії, витраченої на привід димососа, вентилятора й насосного парку;  $E_{12}$  – ексергія продуктів згоряння на виході з теплогенератора

Аналіз розглянутих технологічних схем показує, що для схеми 1 «ексергія продукту» буде визначатися як:

$$\Sigma E_P = (E_3 - E_2) + (E_1 - E_4) + E_7, \quad (2)$$

а для схеми 2

$$\Sigma E_P = (E_3 - E_2) + (E_{11} - E_4) + E_7 + E_8. \quad (3)$$

«Ексергія палива» для схем 1 і 2

$$E_{F.tot} = E_5 + E_6 + E_9 + E_{10} + E_{11}. \quad (4)$$

Втрати ексергії для схеми 1 можуть бути отримані з вираження

$$E_{L.tot} = E_8 + E_{12}, \quad (5)$$

а для схеми 2

$$E_{L.tot} = E_{12}. \quad (6)$$

Питома хімічна ексергія палив,  $кДж/кг$ , визначається з використанням вищої теплоти згоряння. Таким чином, для твердого палива рівняння для розрахунку має вигляд:

$$e_x = Q_p^B \cdot (1 - W), \quad (7)$$

де  $W$  – вологість палива, 0,06;

а для рідкого палива:

$$e_x = 0.975 \cdot Q_p^B, \quad (8)$$

де  $Q_p^B$  – вища теплота згоряння дизельного палива,  $\text{кДж/кг}$ .

Повна хімічна ексергія палива,  $\text{кДж/с}$ , визначається з вираження:

$$E_T = e_x \cdot B, \quad (9)$$

де  $B$  – витрата палива,  $\text{кг/с}$ .

Питома ексергія вологого повітря визначається з вираження [3, 4]:

$$e_{BB} = e_{BB}^M + e_{BB}^t + e_{BB}^e, \quad (10)$$

де  $e_{BB}^M$  – механічна ексергія,  $\text{кДж/кг}$ ;

$e_{BB}^t$  – термічна ексергія,  $\text{кДж/кг}$ ;

$e_{BB}^e$  – вологісна складова ексергії,  $\text{кДж/кг}$ .

Складові ексергії вологого повітря визначаються з виражень:

$$e_{BB}^M = T_0 \cdot R_{нар} \cdot (0.622 + d_e) \cdot \ln \frac{p_{ex}}{p_0}, \quad (11)$$

$$e_{BB}^t = T_0 \cdot \left( c_{p_{жк}} + d_{ex} \cdot c_{p_{нар}} \right) \cdot \left( \frac{T_{ex}}{T_0} - 1 - \ln \frac{T_{ex}}{T_0} \right), \quad (12)$$

$$e_{BB}^e = T_0 \cdot R_{нар} \cdot (0.622 + d_e) \cdot \ln \frac{0.622 + d_0}{0.622 + d_{ex}} + d_{ex} \cdot \ln \frac{d_{ex}}{d_0}. \quad (13)$$

Характеристики вологого повітря й навколишнього середовища, використані для розрахунків по рівняннях (11–13), наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Теплотехнічні характеристики вологого повітря й навколишнього середовища

Характеристика	Позначення	Одиниці виміру	Величина
Температура вологого повітря	$T_{BB} = t_{BB} + 273$	$K$	293
Тиск вологого повітря перед подачею у ДВС	$p_{BB} = p_0$	$Па$	98642
Тиск вологого повітря перед подачею в теплогенератор	$p_{BB} = p_0 + \Delta p$ $\Delta p = 400 Па$	$Па$	99042
Відносна вологість повітря	$\varphi$	%	70
Вологовміст	$d = d_0$	$\text{г/кг с.п.}$	0,0105
Температура навколишнього середовища	$T_0 = t_0 + 273$	$K$	293
Тиск навколишнього середовища	$p_0$	$Па$	98642
Газова стала водяної пари	$R_{нар}$	$\text{кДж/кг}$	0,461

Повна ексергія вологого повітря визначається з вираження:

$$E_{BB} = e_{BB} \cdot m_{CB}, \quad (14)$$

де  $m_{CB}$  – масова витрата сухого повітря, кг с.п./с, що визначається з вираження:

$$m_{CB} = \frac{p_{CB} \cdot V_{BB}}{R_{CB} \cdot T_{BB}}, \quad (15)$$

де  $p_{CB}$  – парціальний тиск сухого повітря, Па;

$R_{CB}$  – газова стала сухого повітря,  $R_{CB} = 287$  Дж/(кг·град);

$T_{BB}$  – температура вологого повітря, ДО;

$V_{BB}$  – дійсна витрата вологого повітря, що подається на горіння в теплогенераторі, м<sup>3</sup>/с.

Парціальний тиск сухого повітря визначається з вираження:

$$p_{CB} = p_0 - p_{II}, \quad (16)$$

де  $p_{II}$  – парціальний тиск пари, Па ( $p_{II} = 1500$  Па).

Питома ексергія потоку води, кДж/кг, визначається по формулі (4):

$$e_{Ж} = T_0 \cdot \left[ c_{p,n} \left( \frac{T_{Ж}}{T_0} - 1 - \ln \frac{T_{Ж}}{T_0} \right) + r_{Ж} \left( \frac{1}{T_{Ж}} - \frac{1}{T_0} \right) + R_{II} \cdot \ln \frac{P_{н.ж}}{\phi_0 \cdot P_{н.о.с}} \right], \quad (17)$$

де  $c_{p,n}$  – середня ізобарна теплоємність водяної пари (1,8671 кДж/(кг·°С));

$r_{Ж}$  – питома теплота паротворення при температурі  $T_{Ж}$ , кДж/кг;

$\phi_{про}$  – відносна вологість повітря в навколишнім середовищі;

$P_{н.ж}$  і  $P_{н.о.с}$  – тиск насичення водяних пар над водою при температурі  $T_{Ж}$  і  $T_0$ , Па;

$R_{II}$  – газова стала водяної пари, ( $R_{II} = 0,461$  кДж/(кг·К)).

Значення  $r_{Ж}$ ,  $P_{н.ж}$ ,  $P_{н.о.с}$  приймаються залежно від відповідних температур [3].

Повна термічна ексергія води, кДж/с, визначається з вираження:

$$E_{Ж} = e_{ЖTi} \cdot G_i, \quad (18)$$

де  $e_{ЖTi}$  – питома ексергія потоку води при відповідній температурі, кДж/кг;

$G_i$  – витрата води, кг/с.

Для розглянутих схем величини ексергій води будуть мати однакові значення, тому що витрати води й значення температур незмінні.

Питома ексергія продуктів згоряння, кДж/м<sup>3</sup>, визначається з вираження (5):

$$e_{пр.сг.вых.} = \Delta e_p + \Delta e_t + e_x, \quad (19)$$

де  $\Delta e_p$ ,  $\Delta e_t$ ,  $e_{пр.сг.х}$  – відповідно питома ізобарна й термічна зміна ексергії, і питома хімічна ексергія продуктів згоряння в інтервалі температур ( $T - T_0$ ), кДж/м<sup>3</sup> пр.сг, де  $T = T_{пр.сг.1}$ .

Продукти згоряння дизельного палива мають наступний состав, м<sup>3</sup>/кг: CO<sub>2</sub> – 1,61, O<sub>2</sub> – 1,5, H<sub>2</sub>O – 0,41, N<sub>2</sub> – 14,3. А продукти згоряння вугілля марки ЖР, м<sup>3</sup>/кг: CO<sub>2</sub> – 1,2, H<sub>2</sub>O – 0,61, N<sub>2</sub> – 5,26. При цьому температура продуктів згоряння на виході з когенераційної установки 120<sup>0</sup>С, а на виході з котлоагрегату – 220<sup>0</sup>С.

При роботі по схемі 2 кисень, що втримується в продуктах згоряння дизельного палива, витрачається на спалювання вугілля, а компоненти, що залишилися, підсумовуються із продуктами згоряння вугілля.

Питома ізобарна зміна ексергії в інтервалі температур ( $T - T_0$ ) дорівнює:

$$\Delta e_p = \Delta i|_{T_0}^T - T_0 \cdot \Delta s|_{T_0}^T, \quad (20)$$

де  $\Delta i|_{T_0}^T, \Delta s|_{T_0}^T$  – відповідно, зміна питомої ентальпії й питомої ентропії продуктів згоряння в інтервалі температур  $(T_0 - T)$ ,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ :

$$\Delta i|_{T_0}^T = c'_p \cdot (T - T_0), \quad (21)$$

$$\Delta s|_{T_0}^T = c'_p \cdot \ln \frac{T}{T_0}, \quad (22)$$

де  $c'_{np, cz}$  – середня ізобарна, об'ємна теплоємність продуктів згоряння в інтервалі температур  $(T_0 - T_{np, cz.1})$ ,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{гp})$ . Для інтервалу  $(T_0 - T_{np, cz.1})$   $c'_{np, cz. KY} = 1,3439 \text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{гp})$ , а  $c'_{np, cz. TTY} = 1,4091 \text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{гp})$ .

Питоме термічне перевищення ексергії

$$e_t = n \cdot R_\mu \cdot T_0 \cdot \ln \frac{p}{p_0}. \quad (23)$$

Тиск продуктів згоряння в газоходах після котлоагрегату й когенераційної установки приймається рівному атмосферному, тобто  $p = p_0$ . Отже, значення термічного перевищення ексергії  $e_t = 0$ .

Питома хімічна ексергія продуктів згоряння,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ ,

$$e_x = R_\mu \cdot T_0 \cdot \sum n_i \cdot \ln \frac{z_i}{z_{0i}}, \quad (24)$$

де  $z_i$  і  $z_{0i}$  – мольний зміст компонента в продуктах згоряння й навколишньому середовищі,  $z_i = n_i$ ;

$R'_\mu$  – універсальна газова постійна, віднесена до  $1 \text{ м}^3$  продуктів згоряння, ( $R_\mu = 0,3712 \text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{гp})$ );

$n_i$  – кількість кіломолей  $i$ -го компонента, *кмоль*.

Кількість кіломолей компонентів у продуктах згоряння дизельного палива:  $\text{CO}_2 - 0,0725$ ;  $\text{O}_2 - 0,068$ ;  $\text{H}_2\text{O} - 0,069$ ;  $\text{N}_2 - 0,639$ ; а вугілля:  $\text{CO}_2 - 0,054$ ;  $\text{H}_2\text{O} - 0,027$ ;  $\text{N}_2 - 0,235$ .

При розгляді схеми 2  $n_i$  складе:  $\text{CO}_2 - 0,0614$ ;  $\text{H}_2\text{O} - 0,0438$ ;  $\text{N}_2 - 0,3966$ .

Ексергія загальної кількості продуктів згоряння,  $\text{кДж}/\text{с}$ , визначається з вираження

$$E_{np, cz.} = e_{np, cz.} \cdot V_{np, cz.} \cdot B, \quad (25)$$

де  $V_{np, cz.}$  – сумарний обсяг продуктів згоряння,  $\text{м}^3/\text{кг}$ .

У процесі роботи когенераційної установки виробляється електроенергія в кількості  $200 \text{ кВт}$ :  $E_7 = N = 200 \text{кДж}/\text{с}$ .

Для забезпечення роботи теплогенератора витрачається електрична енергія на роботу насосного парку, вентиляторів та димососів, освітлення котельні. Витрати електроенергії комплексом «КУ-теплогенератор» при роботі по першій схемі становлять  $55 \text{ кВт}$ , при роботі по другій –  $60 \text{ кВт}$ . Отже,  $E_{11} = 55 \text{кДж}/\text{с}$  для схеми 1 і  $E_{11} = 60 \text{кДж}/\text{с}$  для схеми 2.

Ексергетичний ККД комплексу «КУ – котлоагрегат» при роботі по схемі 1 визначається з вираження

$$\eta_{tot} = \frac{(E_3 - E_2) + (E_1 - E_4) + E_7}{E_5 + E_6 + E_9 + E_{10} + E_{11}}, \quad (26)$$

а при роботі зі схеми №2

$$\eta_{tot} = \frac{(E_3 - E_2) + (E_1 - E_4) + E_7 + E_8}{E_5 + E_6 + E_9 + E_{10} + E_{11}}. \quad (27)$$

Результати розрахунків зведені в таблицю 3.

Таблиця 3

Результати розрахунків потоків ексергій і ексергетичних ККД

Потік ексергії, кДж/с	Схема1	Схема2
Ексергія води на виході з теплогенератора при $t_1$ , $E_1$	597,35	597,35
Ексергія води на вході в КУ при $t_2$ , $E_2$	82,4	82,4
Ексергія води на виході з КУ при $t_3$ , $E_3$	87,71	87,71
Ексергія води на вході в теплогенератор при $t_{cm}$ , $E_4$	473,72	473,72
Ексергія дизельного палива для спалювання у ДВС, $E_5$	797	797
Ексергія вологого повітря для спалювання дизельного палива, $E_6$	0	0
Ексергія виробленої електричної енергії, $E_7$	200	200
Ексергія продуктів згоряння на виході з КУ, $E_8$	12,8	12,8
Ексергія твердого палива для спалювання в теплогенераторе, $E_9$	1293	1228
Ексергія вологого повітря для повного спалювання твердого палива, $E_{10}$	0,102	0,097
Ексергія електричної енергії, витраченої на привод димососа, вентилятора й насосного парку, $E_{11}$	55	60
Ексергія продуктів згоряння на виході з теплогенератора, $E_{12}$	19,6	22,39
«Ексергія палива», $E_{F,tot}$	2145,1	2085,1
«Ексергія продукту», $E_{P,tot}$	328,94	381,23
Втрати ексергії, $E_{L,tot}$	32,4	22,39
Ексергетичний ККД системи, $\eta_E, \%$	15,33	16,39

### Висновок

Результати розрахунків показують, що ексергетичний ККД комплексу «КУ-теплогенератор» при роботі по схемі 2 вище, ніж при роботі по схемі 1. Це досягається за рахунок додаткового внесення в топкову камеру котлоагрегату теплоти із продуктами згоряння ДВЗ. Даний захід дозволяє скоротити витрату вугілля, що спалюється, при збереженні параметрів води на виході з теплогенератора відповідно до розробленого температурного графіка. Хоча підвищення ексергетичного ККД (1%) у масштабах однієї установки малої потужності і є незначним у рішенні глобальної проблеми економії паливо-енергетичних ресурсів, але заміна дорогого природного газу на вугілля й дизельне паливо дозволять не тільки зменшити енергозалежність об'єктів ЖКГ від експортованих видів палива, але й знизити витрати на виробництво теплової енергії.

### *Список літератури*

1. Галузева програма енергоефективності та енергозбереження в житлово-комунальному господарстві на 2010-2014 рр. – К.: Міністерство з питань житлово-комунального господарства, 2009. – 26 с.
2. Морозюк Т.В. Теория холодильных машин і теплових насосов. – Одесса: Студия «Негоциант», 2006. – 712 с.
3. Эксергетические расчеты технических систем: справ. пособие / В.М. Бродянский, Г.П. Верховкер, Я.Я. Карчев и др.; под. ред. А.А. Долинского, В.М. Бродянского / АН УССР. Ин-т технической теплофизики. – К.: Наук. думка, 1991. – 360 с.
4. Бродянский В.М. Эксергетический метод и его приложения / В.М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек; под ред. В.М. Бродянского. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
5. Шаргут Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – М.: Энергия, 1968. – 278 с

Рецензенти: д.т.н., проф. С.П. Висоцький, АДІ ДВНЗ «ДонНТУ»;  
д.т.н., проф. А.О. Олексюк, «ДонНАБА».

Стаття надійшла до редакції 15.04.11  
© Дмитроченкова Е.І., Монах С.І., Орлов С.М., 2011