

УДК 621.18.018.4
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/27>

Волощук В.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Некрашевич О.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гікало П.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕКСЕРГЕТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ З УРАХУВАННЯМ ЗМІННИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ

На відміну від енергетичного аналізу, який найчастіше використовується у науковій та інженерній практиці і базується на застосуванні тільки першого закону термодинаміки, ексергетичний підхід, що поєднує як перший, так і другий закон термодинаміки, дозволяє визначити місце, значення і джерела термодинамічних втрат під час передачі та перетворення енергії.

У роботі наведено ексергетичне оцінювання когенераційної установки на базі протитискової парової турбіни типу P-2,5-15/3M з урахуванням змінного навантаження, зумовленого зміною споживання теплоти житловим комплексом. Розрахункове теплове навантаження на опалення і гаряче водопостачання від когенераційної установки взимку дорівнює 49 МВт. Розрахункова температура прямої води системи теплопостачання взимку становить 115°C, а зворотної – 70°C. У літній період розрахункове теплове навантаження на гаряче водопостачання дорівнює 13 МВт, а розрахункова температура прямої і зворотної води системи теплопостачання становить відповідно 70°C та 50°C. Динаміку режимів роботи установки запропоновано здійснити на основі квазістаціонарного підходу з часовим кроком 24 години із визначенням добових і річних значень таких параметрів ексергетичного оцінювання, як деструкція ексергії та ексергетичного ККД. У програмному пакеті MathCad із застосуванням бібліотеки для розрахунку теплофізичних властивостей робочих тіл Coolprop розроблено і впроваджено відповідну математичну і комп'ютерну модель, представлену системою алгебраїчних рівнянь. Для розв'язання системи рівнянь використано градієнтний числовий метод пошуку рішення, вбудований у MathCad. На основі отриманих даних показано, що для підвищення енергетичної ефективності ТЕЦ потрібно передусім підвищити термодинамічну ефективність парового котла шляхом збільшення параметрів (тиску і температури) пари, а потім – мережевого підігрівача за рахунок зменшення температурного напору у ньому шляхом зниження тиску пари після парової турбіни.

Ключові слова: когенераційна установка, змінні режими роботи, деструкція ексергії, ексергетичний ККД.

Постановка проблеми. Комбіноване виробництво теплової та електричної енергії є високо-ефективним процесом, який одночасно генерує електрику і тепло, може забезпечити суттєву економію первинної енергії порівняно із роздільним виробництвом [1].

Упродовж останніх десятиліть в Україні підготовлено базу для широкого впровадження когенераційної техніки у різних галузях економіки: розроблено конкретні проекти когенераційних установок різного типу, досліджені потенціальні можливості розвитку когенерації в Україні [2, 3],

прийнято у 2005 році Закон України «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) і використання скидного енергопотенціалу» [4], а також підзаконні акти до нього, які стимулюють розвиток когенерації в Україні із дотриманням принципів та положень законодавства Європейського Союзу.

У випадку аналізу систем когенерації важливу роль відіграють показники та методи їх визначення. Зокрема, одним із можливих методів оцінювання ефективності когенерації є так званий коефіцієнт використання теплоти палива [5]:

$$\eta_f = \frac{Q + N}{BQ_p^H}, \quad (1)$$

де Q та N – кількість теплоти та електроенергії, що відпускається;

B – витрата палива; Q_p^H – нижча теплота згорання палива.

У виразі (1) підсумовування теплової та електричної енергії, які не можна вважати рівноцінними видами енергії, є некоректним. Відповідно і коефіцієнт використання теплоти палива у когенераційній установці не дає об'єктивної інформації енергетичної ефективності таких систем.

Науково обґрунтованими методами оцінювання ефективності когенераційних установок можуть бути ті, які базуються на поєднанні як першого, так і другого законів термодинаміки. У цьому випадку є можливість кількісного оцінювання якості енергоресурсів, що використовуються або отримуються.

На відміну від енергетичного аналізу, який найчастіше використовується у науковій та інженерній практиці, поєднання ексергетичного, економічного та екологічного методів оцінювання дозволяє визначити місце, значення, джерела, вартість і негативний вплив на довкілля термодинамічних втрат під час процесів передачі та перетворення енергії [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Постановці та розв'язанню задач оцінки вартості двох продуктів системи, що виробляються одночасно на основі ексергетичного підходу (так звана CGAM-задача), присвячено серію робіт [7, 8], де кожен із авторів запропонував застосування власного методу поєднання ексергетичного та економічного аналізу для визначення оптимальних параметрів когенераційної ГТУ у стаціонарному режимі роботи.

У роботі [9] наведено огляд публікацій, присвячених енергетичному, ексергетичному, ексергоекономічному та економічному (4E) оцінюванню теплових електростанцій. Проаналізовано шістнадцять робіт, які досліджували саме когенераційні установки з позицій ексергетичного аналізу.

У статті [10] наведено огляд робіт з ексергетичного аналізу та порівняння когенераційних установок різних типів і показано, зокрема, що:

– в існуючих публікаціях не досить уваги приділено ексергетичному оцінюванню когенераційних установок невеликої потужності для теплозабезпечення житлового сектору;

– мало робіт присвячено рішенням із підвищення ексергетичної ефективності таких установок.

Автори [11] пропонують огляд праць, присвячених ексергоекономічному аналізу та оптимізації когенераційних установок. Розглянуто дизельну

когенераційну систему та запропоновано залежності для її ексергоекономічного оцінювання.

На основі проведеного аналізу існуючих праць можна зробити висновок, що нині є потреба подальшого розроблення і здійснення методів ексергетичного оцінювання когенераційних систем із метою обґрунтування параметрів та режимів роботи задля підвищення їх ефективності. У роботах, присвячених ексергетичному аналізу когенераційних систем, розглядалися переважно стаціонарні режими. Застосування таких критеріїв ексергетичного аналізу, як деструкція ексергії, ексергетичний ККД як для окремих елементів, так і для системи загалом, а також здійснення методології поглибленого ексергетичного, ексергоекономічного та ексергоприродничого оцінювання з урахуванням змінного навантаження дозволило би більш обґрунтовано і точніше визначити параметри та режими роботи когенераційних установок.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є ексергетичне оцінювання когенераційної установки на основі протитискової парової турбіни з урахуванням її змінного навантаження, зумовленого зміною споживання теплоти житловим комплексом.

Виклад основного матеріалу. У рамках цієї роботи використано методологію ексергетичного аналізу, розроблену представниками німецької школи прикладної термодинаміки, яка містить уведення понять «ексергія палива» (E_p) та «ексергія продукту» (E_r) [12, 13].

Для оцінювання термодинамічної неефективності розраховуються «деструкція ексергії» (\dot{E}_D) та «втрати ексергії» (\dot{E}_L) [13, 14]

$$\dot{E} = \dot{E}_D + \dot{E}_L \quad (2)$$

Деструкція ексергії (exergy distruction) – це необоротності, наявні в елементі системи (хімічна реакція, передача теплоти за кінцевої різниці температур, змішування речовин із різним складом або станом, тертя, самовільне розширення). Наприклад, передача теплоти від гарячого потоку до холодного можлива тільки за наявності температурного напору. Як результат, енергія з вищого температурного рівня переходить на нижчий, тобто наявна деструкція (втрати, розсіювання, знищення) ексергії. Різниця температур між гарячим і холодним теплоносієм, з одного боку, визначає деструкцію ексергії, а з іншого – визначає площу теплообмінної поверхні (капітальні затрати, затрати на ремонт та обслуговування теплообмінника). Втрати ексергії (exergy losses) відбуваються під час аналізу умов взаємодії компонента системи із навколишнім середовищем. Наприклад, якщо температура зовнішньої

оболонки теплообмінника є вищою за температуру навколишнього середовища, то у цьому випадку якраз відбуваються втрати ексергії. Для спрощення аналізу втрати ексергії визначають для системи загалом $\dot{E}_{L,tot}$ [15, 16].

Тоді ексергетичний баланс для усієї системи передачі та перетворення енергії матиме вигляд [17]:

$$\dot{E}_{F,tot} = \dot{E}_{P,tot} + \sum_k \dot{E}_{D,k} + \dot{E}_{L,tot}, \quad (3)$$

де $\dot{E}_{F,tot}$, $\dot{E}_{P,tot}$ – відповідно ексергія палива і продукту системи загалом;

$\dot{E}_{D,k}$ – деструкція ексергії у k – елементі.

Ексергетичний баланс для k -го елемента системи має вигляд [0]:

$$\dot{E}_{F,k} = \dot{E}_{P,k} + \dot{E}_{D,k}, \quad (4)$$

Величини $\dot{E}_{D,k}$ та $\dot{E}_{L,tot}$ є абсолютними характеристиками термодинамічної ефективності системи.

У роботі також використано відносні показники термодинамічної ефективності [0]:

– ексергетичний ККД системи

$$\mu_{tot} = \frac{\dot{E}_{P,tot}}{\dot{E}_{F,tot}} = 1 - \frac{\dot{E}_{D,tot} + \dot{E}_{L,tot}}{\dot{E}_{F,tot}}; \quad (5)$$

та для k -го елемента

$$\mu_k = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k}} = 1 - \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{F,k}}. \quad (6)$$

Моделювання здійснювалося на основі рівнянь масового, енергетичного, ексергетичного балансів контрольних об'ємів (для окремих елементів системи), рівнянь теплопередачі, а також емпіричних і напівемпіричних залежностей, які описують теплоенергетичні процеси у компонентах системи.

Наразі прийнято, що тривалість перехідних процесів є значно меншою порівняно з динамікою зміни режиму роботи системи. Саму динаміку режимів роботи системи пропонують здійснити на основі квазістаціонарного підходу із часовим кроком $\tau_n = 24$ години. Відповідно критерії ексергетичного аналізу як для окремих елементів, так і для системи загалом визначалися для кожного добового проміжку часу. Крім добових значень цих критеріїв також розраховувалися річні значення деструкції ексергії у компонентах установки та у системі загалом:

$$E_{D,k}^{yr} = E_{F,k}^{yr} - E_{P,k}^{yr}, \quad (7)$$

а також осереднений ексергетичний ККД

$$\varepsilon_k^{yr} = \frac{E_{P,k}^{yr}}{E_{F,k}^{yr}}, \quad (8)$$

де $E_{F,k}^{yr}$, $E_{P,k}^{yr}$ – річні значення ексергії палива та продукту відповідно, які розраховувалися шляхом підсумовування їх добових значень, кВт·год.

Математичне моделювання досліджуваної установки базується на здійсненні алгоритму розв'язання системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, які містять рівняння теплових балансів і теплопередачі як для окремих частин (охолодження, конденсація) мережевого підігрівача та охолоджувача конденсатора, так і загалом для цих поверхонь підігріву; балансові рівняння масових витрат; рівняння, що описують окремі процеси у системі (розширення робочого тіла у турбіні); рівняння із визначення гідравлічних опорів під час руху робочих тіл і теплоносіїв. Загалом розроблена математична модель містить більше 25-ти рівнянь. Теплофізичні властивості робочих тіл визначалися за допомогою пакету Coolprop [0]. Розв'язок цієї системи можна здійснити за допомогою програмних пакетів. У роботі використаний MathCad [0] і градієнтний числовий метод пошуку рішення, прямо вбудований у цей програмний пакет.

Принципова схема паротурбінної когенераційної установки представлена на рис. 1. У котлі 1 генерується перегріта пара із тиском 1,5МПа і температурою 380°C, яка потім подається на протитискову парову турбіну із тиском на виході 0,2 МПа і температурою 190°C (турбіна типу Р-2,5-15/3М). Після турбіни пара подається на мережевий підігрівач 3, де конденсується, передаючи енергію у формі теплоти для нагрівання мережевої води системи централізованого теплопостачання. Після цього мережева вода ще додатково нагрівається в охолоджувачі конденсату 4; останній потім подається через деаератори та інше допоміжне обладнання (для спрощення тут не показано) назад у котел. Розрахункове теплове навантаження на опалення та гаряче водопостачання від когенераційної установки взимку дорівнює 49МВт. Розрахункова температура прямої води системи теплопостачання становить 115°C, а зворотної – 70°C. У літній період розрахункове теплове навантаження на гаряче водопостачання дорівнює 13МВт, а розрахункова температура прямої і зворотної води системи теплопостачання становить відповідно 70°C та 50°C.

На рис. 2 зображено отримані на основі розробленої моделі значення добових показників деструкції ексергії $E_{D,k}(\tau_n)$ в елементах когенераційної установки упродовж року. За даними рис. 2, абсолютні значення деструкції ексергії в елементах установки змінюються протягом року. Причому упродовж опалювального сезону ці зміни є більш суттєвими, ніж упродовж періоду тільки гарячого водопостачання. Крім того, у

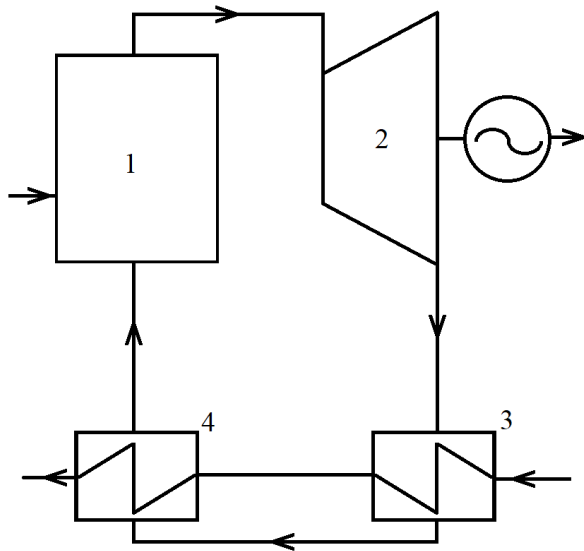


Рис. 1. Принципова схема досліджуваної паротурбінної когенераційної установки: 1 – котел; 2 – турбіна; 3 – мережевий підігрівач; 4 – охолоджувач конденсату

межах опалювального сезону для котла, мережевого підігрівача і системи загалом добові значення деструкції ексергії є більшими порівняно із періодом, коли опалення було відсутнім. Зокрема,

для котла протягом холодного періоду добові значення деструкції ексергії змінюються у межах 300-700 кВт·год. У мережевому підігрівачі для цього ж періоду $E_{D,k}(\tau_n)$ коливаються у межах 14-65 кВт·год. У турбіні та охолоджувачі конденсату добові значення деструкції ексергії є незначними і коливаються у межах 0,5-13 кВт·год. Для системи загалом параметр $E_{D,tot}(\tau_n)$ коливається у межах опалювального сезону від 300 до 780 кВт·год.

У теплий період року, коли наявне тільки гаряче водопостачання, деструкція ексергії у компонентах установки змінюється несуттєво. Наприклад, у котлі добове значення цього параметру знаходиться на рівні 330 кВт·год, у мережевому підігрівачі, охолоджувачі конденсату і турбіні – не перевищує 15 кВт·год. Для досліджуваної установки загалом параметр $E_{D,tot}(\tau_n)$ знаходиться на рівні 350 кВт·год.

На рис. 3 показано зміну протягом року ексергетичного ККД основних елементів досліджуваної паротурбінної когенераційної установки. Видно, що цей коефіцієнт змінюється протягом усього року, що зумовлено змінними режимами роботи компонентів. За даними рис. 3, найбільший ексергетичний ККД характерний для парової турбіни (вище 90%). Ексергетичні ККД мережевого

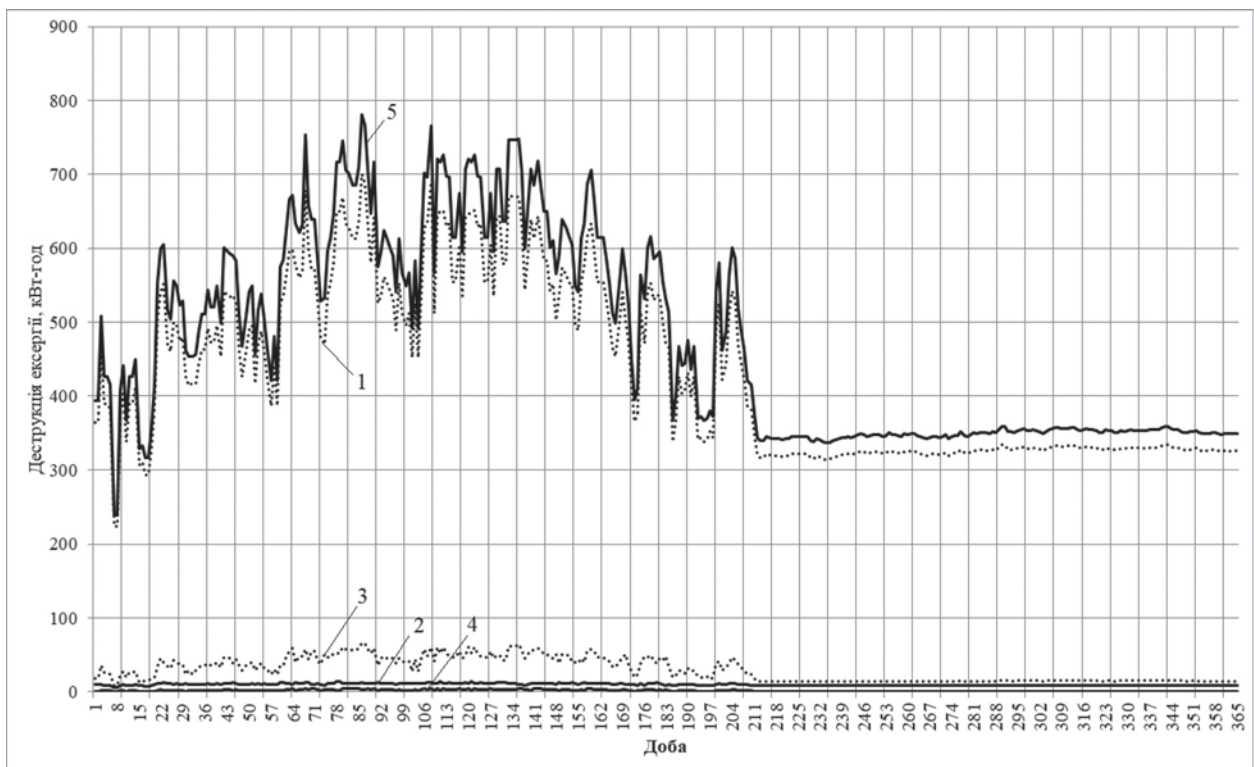


Рис. 2. Зміна добових значень деструкції ексергії у компонентах паротурбінної когенераційної установки протягом опалювального сезону: 1 – котел; 2 – турбіна; 3 – мережевий обігрівач; 4 – охолоджувач конденсату; 5 – система загалом

підігрівача та охолоджувача конденсату приблизно однакові і знаходяться на рівні 65-76 %. Ексергетичний ККД парового котла є найнижчим і змінюється у межах 31-35%. Унаслідок цього ексергетичний ККД паротурбінної когенераційної установки загалом є нижчим за 30%.

За даними рис. 4, найбільші сумарні значення річної деструкції ексергії відмічені у паровому котлі

і дорівнюють 157835 кВт-год. У турбіні, мережевому підігрівачі та охолоджувачі конденсату сумарні значення річної деструкції ексергії відповідно дорівнюють 3574, 10788 та 554 кВт-год, тобто на 90% є меншими порівняно з паровим котлом. Основний внесок у формування річного значення деструкції ексергії в установці загалом (172751 кВт-год.) спричинений необоротностями у котлі.

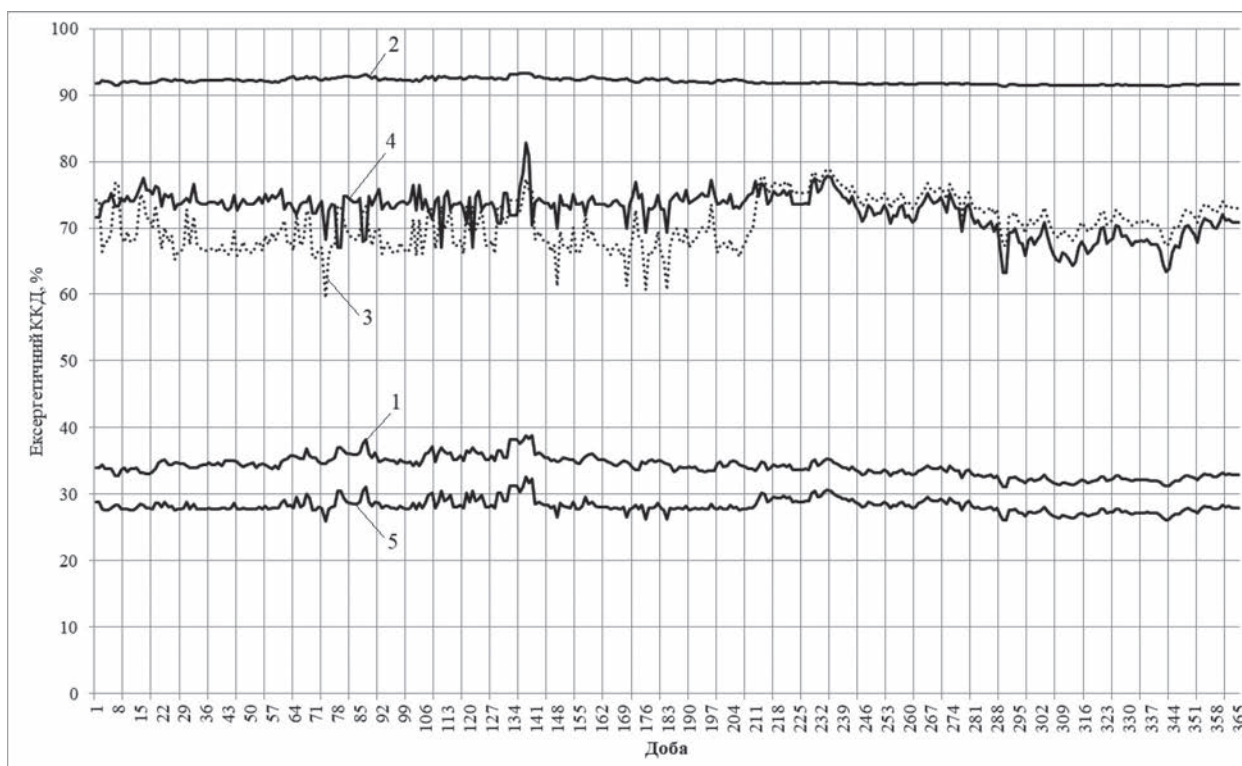


Рис. 3. Зміна добових значень ексергетичного ККД компонентів паротурбінної когенераційної установки протягом опалювального сезону:

1 – котел; 2 – турбіна; 3 – мережевий підігрівач; 4 – охолоджувач конденсату; 5 – система загалом

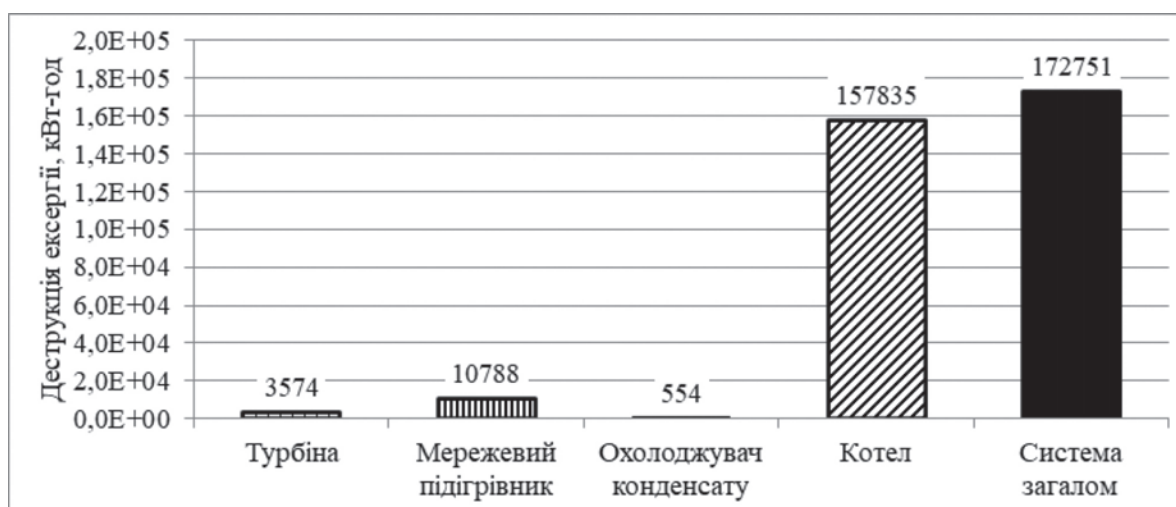


Рис. 4. Річні значення деструкції ексергії в основних елементах паротурбінної когенераційної установки

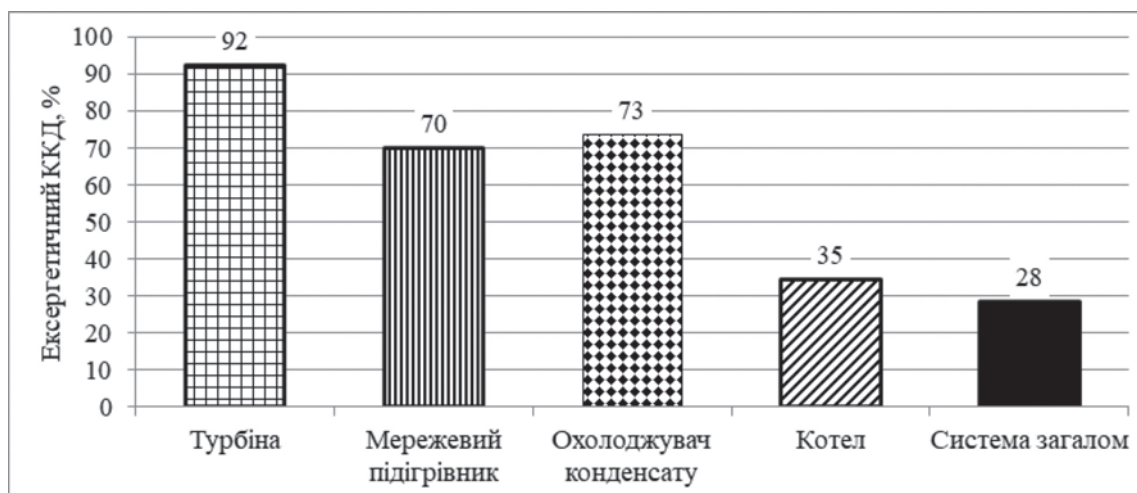


Рис. 5. Середньозважені річні ексергетичні ККД основних елементів паротурбінної когенераційної установки

На рис. 5 наведено осереднені річні ексергетичні ККД основних елементів паротурбінної когенераційної установки, за якими видно, що коефіцієнт для турбіни, мережевого підігрівача, охолоджувача конденсату і котла дорівнює відповідно 92, 70, 73 та 35%. Середньозважений річний ексергетичний ККД ТЕЦ дорівнює 28%.

Підсумовуючи отримані результати, можна зробити висновок, що найбільшого підвищення енергетичної ефективності досліджуваної паротурбінної когенераційної установки можна забезпечити шляхом зниження необоротних процесів у паровому котлі. Як відомо, до процесів, які спричиняють найбільші необоротності у котлі, відносять сам процес горіння і передачу теплоти від продуктів згоряння до води та водяної пари. Якщо процесу згоряння у цьому випадку уникнути неможливо, то знизити необоротність під час передачі теплоти можна шляхом підвищення параметрів (тиску і температури) пари, що генерується котлом. Як показує аналіз, деякого підвищення енергетичної ефективності установки можна досягти за допомогою зниження необоротностей у мережевому підігрівачі шляхом зменшення температурного напору у ньому. У випадку незмінних температур мережевої води це можна досягти шляхом зниження тиску пари після парової турбіни.

У подальшому передбачено здійснення поглибленого ексергетичного, ексергоекономічного та ексергоприродничого оцінювання подібних когенераційних установок з урахуванням перехідних процесів.

Висновки. В роботі наведено ексергетичне оцінювання когенераційної установки на базі протитискової парової турбіни з урахуванням її змінного навантаження, зумовленого зміною споживання теплоти житловим комплексом. Задля цього розроблено відповідну математичну та комп'ютерну модель, представлену системою алгебраїчних рівнянь, що дозволило здійснити квазістаціонарний підхід із часовим кроком 24 години для дослідження змінних режимів роботи установки у межах року.

Показано, що для підвищення енергетичної ефективності ТЕЦ потрібно передусім підвищити термодинамічну ефективність парового котла шляхом збільшення параметрів (тиску і температури) пари, а потім мережевого підігрівача за рахунок зменшення температурного напору у ньому шляхом зниження тиску пари після парової турбіни.

Статтю підготовлено у рамках виконання проекту «Розроблення техніко-технологічних схем і систем керування теплозабезпеченням населених пунктів на основі термодинамічних підходів» (номер державної реєстрації НДР 0120U102168).

Список літератури:

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: Учебник для вузов – 7-е изд., стереотип. Москва : Изд-во МЭИ, 2001. 472 с.
2. Басок Б. І., Новосельцев О.В., Дубовський С.В., Базеев Є.Т. Модернізація системи теплопостачання населених пунктів України. Теплофізика, Енергоефективність, Енергоекономіка, Екологія. Київ, 2018. 412 с.

3. Клименко В.М. Перспективи застосування когенераційних технологій у комунальній енергетиці. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2018. №40(3). С. 32-37.
4. Закон України Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу. *Відомості Верховної Ради*. 2005. № 20. С. 278-285.
5. Morosuk T., Tsatsaronis G. Advanced exergy-based methods used to understand and improve energy-conversion systems. *Energy*. 2019. Vol. 169. P. 238-46.
6. Tsatsaronis G., Pisa J., Valero A., Lozano M.A., Serra L., Von Spakovsky M.R., Frangopoulos C. CGAM Problem: Definition and conventional solution. *Energy*. 1994. Vol. 19. P. 279–286.
7. Tsatsaronis G. Exergoeconomic evaluation and optimization of energy systems – application to the CGAM problem. *Energy*. 1994. Vol. 19. P. 287–321.
8. Von Spakovsky M.R. Application of engineering functional analysis to the analysis and optimization of the CGAM problem. *Energy*. 1994. Vol. 19. P. 343–364.
9. Frangopoulos C. Application of the thermoeconomic functional approach to the CGAM problem. *Energy*. 1994. Vol. 19. P. 323–342.
10. Valero A., Lozano M.A., Serra L., Torres C. Application of the exergetic cost theory to the CGAM problem. *Energy*. 1994. Vol. 19. P. 365–381.
11. Kumar R. A critical review on energy, exergy, exergoeconomic and economic (4- E) analysis of thermal power plants. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2017. Vol. 20(1). P. 283-92.
12. Mahian O., Mirzaie M.R., Kasaeian A., Mousavi S.H. Exergy analysis in combined heat and power systems: a review. *Energy conversion and management*. 2020. Vol. 226 P. 113467. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113467.
13. Abusoglu A., Kanoglu M., Exergoeconomic analysis and optimization of combined heat and power production: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2009. Vol. 13 (9). P. 2295–2308.
14. Tsatsaronis G. Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. *Energy*. 2007. Vol. 32. P. 249–253.
15. Bejan A. Tsatsaronis G., Morgan M. *Thermal Design and Optimization*. New York. Wiley. 1996. 542 p.
16. Bell I.H., Wronski J., Quoilin S., Lemort V., Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014. Vol. 53(6). P. 2498-2508.
17. Mathcad: engineering calculation software: URL: <https://www.mathcad.com/en/>

Voloshchuk V.A., Nekrashevych O.V., Hikalo P.V. EXERGETIC PERFORMANCE ESTIMATION OF COGENERATION SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT VARIABILITY OF OPERATION MODES

In contrast to the energy-based approach which is widely applied in research and engineering and uses the first law of thermodynamics the exergy-based one which combines both the first and the second laws of thermodynamics provides a possibility to identify and calculate the location, magnitude and causes of thermodynamic inefficiencies in processes of energy transfer and conversion.

The paper presents exergetic evaluation of combined heat and power system based on the boiler and backpressure steam turbine of R-2.5-15-3M type taking into into account variability of loads due to changes of heat consumption. The design capacity of the combined heat and power system for heating and domestic hot water is equal to 49 MW. The supply and return temperatures for the design mode in winter are equal to 115°C and 70 °C, respectively. For the summer period the design capacity for domestic hot water is equal to 13 MW and the temperatures of supply and return water are equal to 70°C and 5 °C, respectively.

The dynamics of the operation modes is estimated on the base of quasi-steady state approach with 24 hr time step exergetic parameters and further calculation of their year values. MathCad software and Coolprop library have been applied for development and implementation of a mathematical and computer model, consisting of a system of algebraic equations. The systems of equations were solved with a gradient numerical method built in MathCad.

The obtained results have shown that for increasing energy efficiency of the investigated system the improvement of thermodynamic efficiency of the steam boiler by increasing outlet steam pressure and temperature should be implemented. The network heater is a component of the second priority for improvement by reducing steam turbine outlet pressure.

Key words: *combined heat and power system, variable modes of operation, exergy destruction, exergetic efficiency*