

6.7 Аналіз ексергетичних характеристик теплоутилізаційних систем котельних установок

Наразі дедалі більше застосування в теплонергетиці знаходять комплексні методики дослідження енергетичних установок на основі ексергетичного підходу. У світовій практиці дослідження із застосуванням ексергетичного підходу все частіше використовуються для аналізу енергетичних установок з метою підвищення їх ефективності. Але зазвичай ексергетична ефективність установок оцінюється за допомогою лише окремих ексергетичних характеристик, наприклад, ексергетичного ККД. Так в роботі [411] наведено результати аналізу на основі ексергетичного ККД ексергетичної ефективності абсорбційної холодильної машини та визначено змінні, що характеризують продуктивність установки. Метою роботи [412] є виконання ексергетичного і ексергоекономічного аналізу для елементів енергетичних установок, ефективність яких оцінюється при різних температурах навколишнього середовища. В роботі [413] на прикладі установки для переробки біомаси виконано ексергетичні дослідження, дані яких послуговували для оцінки загальної та ексергетичної ефективності установки. В роботі [414] використовуються результати ексергетичного аналізу систем перетворення енергії з метою вдосконалення цих систем. Однак відсутність відповідної формальної процедури використання результатів цього аналізу значно обмежує його застосування. Метою роботи [415] є встановлення за допомогою енергетичних і ексергетичних досліджень ефективності окремих компонентів атомної електростанції, що мають високі втрати ексергії. В роботі [416] розглядаються результати порівняльного ексергетичного аналізу систем утилізації теплоти газового двигуна. Використання для ексергетичних досліджень окремих ексергетичних характеристик, зокрема ексергетичного ККД, не дозволяє врахувати деякі важливі аспекти досліджуваних процесів. До прикладу при такому підході не враховується цільове призначення процесу, існує неоднозначність трактування

корисних ефектів і витрат, неможливість встановити локалізацію ексергетичних втрат. Тому при оцінці досконалості роботи енергетичних установок доцільно використовувати комплексні методики, які поєднують сучасні методи дослідження та застосовувати комплексні критерії оцінки ефективності. У роботах [417-426] для аналізу ефективності теплоутилізаційних систем використано комплексні методики на основі ексергетичного підходу. В роботах [417, 418] досліджено локальні ексергетичні втрати в процесах теплопровідності. Для цього застосовано комплексну методику, яка включає методи ексергетичного аналізу, методи теорії лінійних систем та теорії теплопровідності. В публікації [419] для аналізу ексергетичної ефективності комбінованої теплоутилізаційної установки використано методику на основі методів ексергетичного аналізу і теорії графів. Враховуючи універсальність ексергетичного підходу, доцільно використовувати його у різних галузях знань, розглядаючи у кожній конкретній ситуації необхідні умови його застосування. В роботах [420–425] комплексні методики на основі ексергетичного підходу застосовано для дослідження теплоутилізаційних систем різної складності.

Широке впровадження сучасних теплоутилізаційних технологій в усіх сферах народного господарства – одна з прикмет нашого часу. Але існують фактори, що стримують їх широке впровадження. Чи не найбільшу увагу серед них привертає конденсатоутворення у газовідвідних трактах котельних установок комунальної теплоенергетики при глибокому охолодженні відхідних газів, і як наслідок корозійне руйнування трактів. Корозійне руйнування газовідвідних трактів суттєво впливає на їхню надійність та зменшує ресурс експлуатації. З огляду на це, особливого значення наразі набувають проблеми вивчення методів антикорозійного захисту газовідвідних трактів, їх теплофізичного обґрунтування та підвищення ефективності застосування [426–429]. Для запобігання корозійному руйнуванню відвідних газопроводів і лимових труб котельних установок застосовуються теплові методи, що забезпечують зниження вологості відхідних газів і тим самим запобігають конденсатоутворенню на стінках вказаних каналів при охолодженні димових

газів нижче точки роси водяної пари, що міститься в газах. До цих методів належать: метод байпасування димових газів повз теплоутилізатор, повітряний метод та метод підсушування газів. Підвищення ефективності теплових методів антикорозійного захисту газовідвідних трактів передбачає проведення системних досліджень на основі сучасних підходів. Як було вказано, одним із результативних підходів для дослідження ефективності енергетичних установок є ексергетичний. В роботі [426] наведено деякі результати застосування комплексних методик на основі ексергетичного підходу для аналізу ефективності теплових методів захисту газовідвідних трактів котельних установок. Однак залишаються невирішеними питання, пов'язані з більш детальними дослідженнями ексергетичних характеристик теплоутилізаційних систем при застосуванні теплових методів захисту. Такі дослідження дозволяють розвивати методи ексергетичного аналізу та підвищувати ефективність енергетичного устаткування.

В даній роботі встановлено закономірності впливу параметрів одного з теплових методів антикорозійного захисту газовідвідних трактів котельних установок (методу підсушування) на ексергетичну ефективність теплоутилізаційної системи котельної установки. Для вирішення цієї проблеми для основних елементів котельної установки, в якій реалізовано метод підсушування димових газів, розроблено структурну схему з ідентифікацією ексергетичних потоків між елементами структури. На основі структурної схеми складено ексергетичне балансове рівняння, за допомогою якого розраховано ексергетичні характеристики, що необхідні для аналізу ексергетичної ефективності при реалізації методу підсушування. Встановлено залежності ексергетичних характеристик від параметрів теплового методу підсушування та визначено оптимальні області зміни кількості підсушених димових газів і теплової потужності котла.

Сутність теплового методу підсушування димових газів для антикорозійного захисту газовідвідних трактів полягає у підвищенні температури та зниженні відносної вологості димових газів, охолоджених у теплоутилізаторі

нижче температури точки роси водяної пари, що знижує інтенсивність конденсації на стінках газовідвідних трактів. З цією метою димові гази підігріваються в поверхневому теплообміннику (газопідігрівачі), встановленому за теплоутилізатором.

Розглядалися газоспоживальні опалювальні котельні установки з котлом теплопродуктивністю 2МВт та теплоутилізаторами для нагрівання тепломережової води. У теплоутилізаційній системі реалізовано тепловий метод підсушування димових газів. Максимальна температура димових газів на вході в теплоутилізатор становить $t = 160,0^{\circ}\text{C}$ при тепловій потужності теплоутилізатора $Q = 62,2\text{кВт}$, мінімальна – $t = 147,0^{\circ}\text{C}$ при тепловій потужності теплоутилізатора $Q = 90,7\text{кВт}$. Температура холодної води на вході в теплоутилізатор становить: $t = 60,0^{\circ}\text{C}$ при тепловій потужності теплоутилізатора $Q = 62,2\text{кВт}$, $t = 48,6^{\circ}\text{C}$ відповідно при $Q = 85,4\text{ кВт}$ і $t = 35,0^{\circ}\text{C}$ при $Q = 90,7\text{кВт}$. Температура прямої тепломережної води на вході в газопідігрівач становить: $t = 93,7^{\circ}\text{C}$ при тепловій потужності теплоутилізатора $Q = 62,2\text{ кВт}$, $t = 71,0^{\circ}\text{C}$ при $Q = 85,4\text{ кВт}$ і $t = 63,5^{\circ}\text{C}$ при $Q = 90,7\text{кВт}$.

Для дослідження ексергетичних характеристик у теплоутилізаційних системах котелень при реалізації методу підсушування використано комплексну методику на основі ексергетичного підходу. Встановлено доцільність використання зазначеного підходу в комплексній методиці, яка поєднує структурно-варіантні методи, інтегральні балансові методи ексергетичного аналізу та вибір характеристик для оцінки ексергетичної ефективності теплоутилізаційної системи. Структурно-варіантні методи застосовано для розробки структурної схеми основних елементів котельної установки, в якій реалізовано метод підсушування. Інтегральні балансові методи ексергетичного аналізу дозволили скласти балансове рівняння для розрахунку ексергетичних характеристик, необхідних для аналізу ексергетичних втрат при реалізації методу підсушування. В рамках комплексної методики обрано ексергетичні характеристики для оцінки ексергетичної ефективності теплоутилізаційної системи, а саме, ексергетичні втрати $E_{\text{втр}}$ та мультиплікативний тепло-

ексергетичний критерій ефективності ϵ , який визначає величину втрат ексергії на одиницю теплової потужності котла. Методика передбачає високу точність одержаних результатів, у середньому 0,4%.

Розроблено структурну схему для основних елементів котельної установки при реалізації методу підсушування димових газів (рис. 1). Схема включає поверхневий теплообмінник (газопідігрівач), встановлений за теплоутилізатором. У газопідігрівачі відбувається підвищення температури та зниження відносної вологості димових газів, охолоджених у теплоутилізаторі, до рівня, що забезпечує відвернення випадення конденсату на внутрішніх стінках газовідвідних трактів.

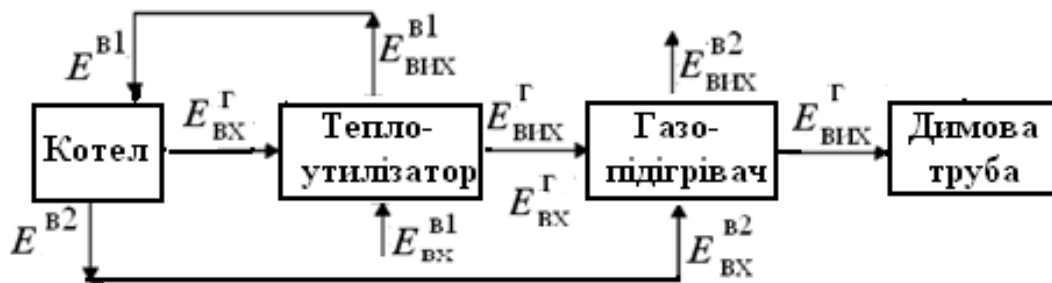


Рисунок 1. Структурна схема основних елементів котельної установки при реалізації теплового методу підсушування димових газів

В структурній схемі ідентифіковано вхідні та вихідні ексергетичні потоки між окремими елементами структури. На основі структурної схеми складено ексергетичне балансове рівняння для розрахунку ексергетичних характеристик для теплоутилізаційної системи при реалізації методу підсушування димових газів:

$$E_{втр} = G^2 c_p^2 (T_{ex}^2 - T_{вих}^2) - T_c G^2 c_p^2 \ln(T_{ex}^2 / T_{вих}^2) - T_c G^2 R / \mu^2 \ln(p_{ex}^2 / p_{вих}^2) + \\ + G^2 (h_{ex}^2 - T_c s_{ex}^2) - G^2 (h_{вих}^2 - T_c s_{вих}^2) - G^1 (h_{вих}^1 - T_c s_{вих}^1) + G^1 (h_{ex}^1 - T_c s_{ex}^1)$$

де c_p – питома теплоємність; E – ексергія; G – витрати теплоносія; h – питома ентальпія; p – тиск; Q – тепла потужність; R – універсальна газова стала; s – питома ентропія; T – абсолютна температура, μ – молекулярна маса. Індокси

верхні: г, в – димові гази, вода, в1 – вода, що нагрівається, в2 – вода, що охолоджується. Індокси нижні: вх, вих – вхід, вихід; с – навколишнє середовище.

З балансового рівняння визначено ексергетичні характеристики, що використовуються для аналізу ексергетичної ефективності теплоутилізаційної системи з методом підсушування: ексергетичні втрати $E_{втр}$ та тепло-ексергетичний критерій ефективності ϵ , який оцінює втрати ексергії на одиницю теплової потужності теплоутилізатора Q (табл. 1). Тут K – кількість підсушуваних газів; Δ – зміна величини.

Ексергетичні характеристики отримано при різних значеннях кількості підсушених газів K та теплової потужності теплоутилізатора Q (табл.1, рис. 2).

Менші значення ексергетичних втрат та тепло-ексергетичного критерія ефективності відповідають більшій ексергетичній ефективності теплоутилізаційної системи. При всіх значеннях теплової потужності котла величини ексергетичних втрат та тепло-ексергетичного критерія зменшуються при збільшенні витрати підсушуваних димових газів. При тепловій потужності теплоутилізатора $Q=85,4\text{кВт}$ і $Q=90,7\text{кВт}$ порівняно з тепловою потужністю теплоутилізатора $Q=62,2\text{кВт}$ відбувається збільшення втрат ексергії за рахунок збільшення різниці вхідної та вихідної температур димових газів, підвищення рівня температур, збільшення витрати димових газів. Але для $Q=90,7\text{кВт}$ при $K\leq 20\%$ більшого впливу надає кінцевий вологовміст димових газів, тому втрати ексергії дещо знижуються порівняно з $Q=85,4\text{кВт}$. За всіх значень витрати підсушуваних димових газів K втрати ексергії найменші при теплопродуктивності теплоутилізатора $Q=62,2\text{кВт}$.

Що стосується тепло-ексергетичного критерію, то для значень $K\leq 20\%$ найменші значення критерію ефективності спостерігаються при тепловій потужності теплоутилізатора $Q=90,7\text{кВт}$. При $K>20\%$ найменші значення критерію ефективності мають місце за теплової потужності теплоутилізатора $Q=62,2\text{кВт}$. Отже, ефективність системи при реалізації методу підсушування

найвища при тепловій потужності теплоутилізатора $Q = 62,2$ кВт і витрати підсушуваних димових газів $K > 20\%$.

Таблиця 1. Основні вихідні дані та результати розрахунку ексергетичних характеристик для теплоутилізаційної системи при реалізації методу підсушування димових газів

Q , кВт	K , %	$\Delta E^{в1}$, кВт	$\Delta E^{в2}$, кВт	ΔE^r , кВт	$E_{втр}$, кВт	ε
62,2	0	7,07	0,30	23,90	17,13	0,275
62,2	10	7,07	0,30	21,64	14,87	0,239
62,2	20	7,07	0,30	19,20	12,43	0,200
62,2	30	7,07	0,30	16,60	9,83	0,159
62,2	40	7,07	0,30	13,83	7,06	0,114
62,2	50	7,07	0,30	10,78	4,01	0,064
62,2	60	7,07	0,30	7,67	0,90	0,014
85,4	0	7,42	0,07	29,43	22,08	0,259
85,4	10	7,42	0,07	27,32	19,97	0,234
85,4	20	7,42	0,07	24,88	17,53	0,205
85,4	30	7,42	0,07	22,27	14,92	0,175
85,4	40	7,42	0,07	19,78	12,43	0,146
85,4	50	7,42	0,07	16,41	9,06	0,106
85,4	60	7,42	0,07	13,21	5,86	0,070
90,7	0	4,95	0,09	24,44	19,58	0,216
90,7	10	4,95	0,09	23,37	18,51	0,204
90,7	20	4,95	0,09	22,13	17,27	0,190
90,7	30	4,95	0,09	20,91	16,05	0,177
90,7	40	4,95	0,09	19,32	14,42	0,159
90,7	50	4,95	0,09	17,66	12,71	0,140
90,7	60	4,95	0,09	15,72	10,86	0,119

Наукова новизна отриманих результатів полягає у застосуванні комплексної методики на основі ексергетичного підходу для аналізу ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем, в яких реалізовано тепловий метод

антикорозійного захисту газовідвідних трактів котельних установок – метод підсушування охолоджених в процесі глибокої утилізації теплоти димових газів.

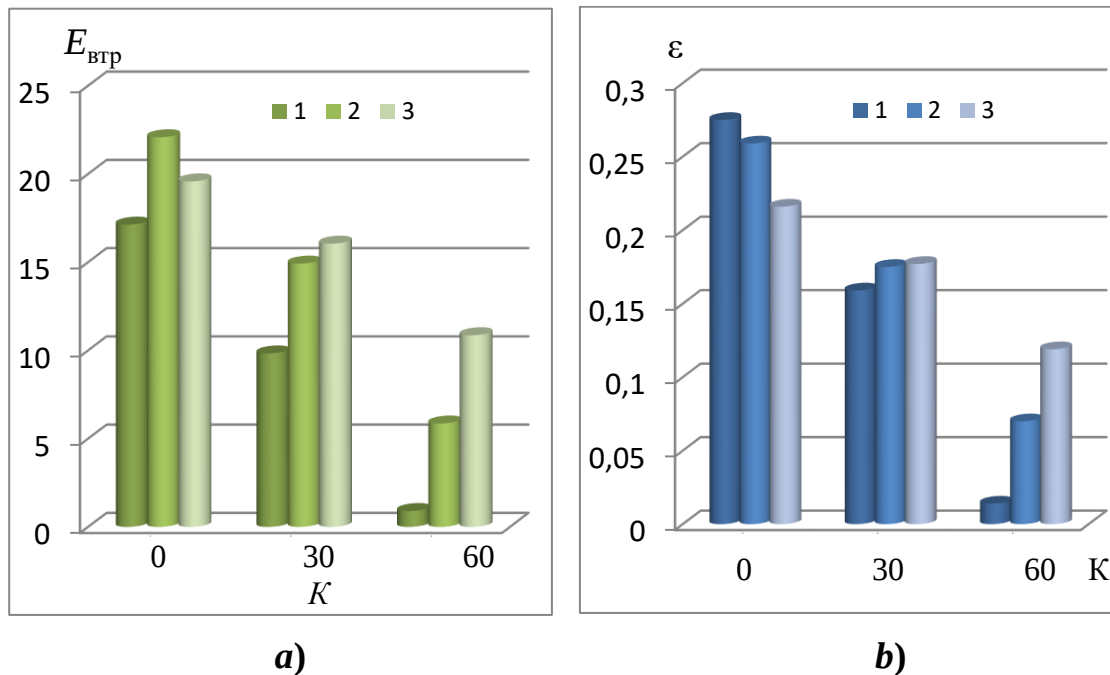


Рисунок 2. Ексергетичні характеристики теплоутилізаційної системи з підсушуванням димових газів при різних значеннях теплової потужності теплоутилізатора Q і витрати підсушуваних газів K : а) ексергетичні втрати E_{vtr} ; б) тепло-ексергетичний критерій ефективності ϵ : 1 – $Q = 62,2$ кВт; 2 – $Q = 85,4$ кВт; 3 – $Q = 90,7$ кВт

Практична цінність пов'язана з можливістю використання отриманих результатів при проектуванні теплоутилізаційних технологій з глибоким охолодженням відхідних димових газів котельних установок.