

6.6 Ексергетична ефективність теплоутилізаційних систем з повітряним методом захисту газовідвідних трактів котелень

При проектуванні котелень з теплоутилізаційними установками приділяється велика увага забезпеченню довговічності газовідвідних трактів. Реалізація в комунальних котельнях сучасних теплоутилізаційних технологій з глибоким охолодженням димових газів в деяких режимах роботи котлів призводить до зниження температури цих газів нижче точки роси і конденсації частини пари, що міститься в газах. Утворений конденсат викликає корозійне руйнування газовідвідних трактів котельних установок. Складні експлуатаційні умови газовідвідних трактів спричиняють необхідність розробки ефективних методів антикорозійного захисту. Один із способів підвищення ресурсу експлуатації газовідвідних трактів пов'язаний із використанням теплових методів їхнього захисту. Однак, застосування цих методів обмежено через відсутність для їх дослідження сучасних комплексних методик. Наразі перспективними дослідженнями, які знаходять все більше використання в енергетиці, є дослідження ефективності енергетичних установок різного типу на основі ексергетичного підходу. Це пов'язано, зокрема, з тим, що вказані дослідження дозволяють отримати важливі характеристики установки, які є достатньо чутливими до зміни конструктивних і режимних параметрів. Але слід відмітити, що на сьогодні дослідження ефективності та оптимізація теплоутилізаційних систем виконуються, як правило, з використанням лише одного з методів аналізу – ексергетичного, технологічного тощо. Це не дозволяє аналізувати роботу установки з різних позицій, і при розробленні її конструкції використовувати параметри, максимально наближені до оптимальних. Створення методик дослідження ефективності та оптимізації теплоутилізаційних систем має базуватись на використанні сучасних комплексних підходів. Ряд досліджень, що присвячені аналізу роботи енерготехнологічних систем на основі комплексних підходів, поєднують ексергетичний аналіз з елементами теорії лінійних систем, багаторівневої

оптимізації та інших. Це дозволяє при дослідженнях оперувати параметрами, відповідальними за ефективність таких систем. Такі параметри можуть бути використані як критерії оцінки термодинамічної ефективності системи. Вказані критерії передбачають застосування як окремих ексергетичних характеристик, так і цих характеристик в комплексі з технологічними та конструктивними параметрами системи.

Однак, при вивченні проблем експлуатації газовідвідних трактів котельних установок відповідні дослідження, що дозволяють отримати необхідну інформацію для проектування оптимальних теплоутилізаційних схем проводилися у недостатньому обсязі.

Дослідження на основі ексергетичного підходу все частіше використовуються в світі. Так, у роботі [396] підкреслюється, що ексергетичний аналіз можна розглядати як спосіб отримання інформації, що дозволяє визначати галузі, в яких можуть бути здійснені технічні поліпшення. Як приклад досліджень, заснованих на застосуванні класу ексергетичних методів, можна навести роботи [397-399]. У роботі [397] розглядається установка з виробництва водню з біомаси. Ексергетичний аналіз використовується для оцінки її загальної та ексергетичної ефективності. У роботі [398] наведено результати ексергетичного аналізу ефективності абсорбційної холодильної машини та визначено змінні, що характеризують продуктивність установки. Для аналізу ефективності котельні в роботі [399] використано балансовий метод ексергетичного аналізу, за допомогою якого розглядаються два основні види ексергетичних втрат. Це втрати, пов'язані з незворотним спалюванням палива та теплопереносом. Однак, застосування даного методу до установок загалом не дозволяє аналізувати ефективність кожного елемента установки, локалізувати ексергетичні втрати та визначати значення характеристик, за яких ці втрати мінімальні. У роботі [400] наголошується, що ексергетичний аналіз є потужним інструментом для розробки, оцінки та вдосконалення систем перетворення енергії. Проте, відсутність відповідної формальної процедури використання результатів цього аналізу значно обмежує широту його застосування. Така

процедура може бути пов'язана із розробкою комплексних методик аналізу ефективності енергетичних установок на основі ексергетичного підходу. При цьому результативність аналізу ексергетичної ефективності значно підвищується. Дослідженням у цій галузі присвячено роботи [401–410]. В роботах [401, 402] проведено аналіз локалізації ексергетичних втрат на основі комплексної методики, яка включає методи ексергетичного аналізу і методи теорії лінійних систем. В роботі [403] використано комплексний підхід із застосуванням теорії графів для аналізу ексергетичної ефективності комбінованої теплоутилізаційної установки. Публікації [404–409] присвячено використанню комплексних методик аналізу ефективності та оптимізації для дослідження як складних теплоутилізаційних систем, так і їхніх окремих елементів. В роботі [410] наведено результати застосування ексергетичного підходу для аналізу впливу на ексергетичні характеристики теплоутилізаційних систем деяких параметрів газовідвідних трактів котельних установок. Однак, залишилися невирішеними питання, пов'язані з більш детальними дослідженнями ексергетичних характеристик теплоутилізаційних систем з тепловими методами захисту. Такі дослідження дозволять одержувати необхідну інформацію для проектування оптимальних теплоутилізаційних схем і встановлювати зв'язок між ексергетичними та екологічними характеристиками газовідвідних трактів котельних установок.

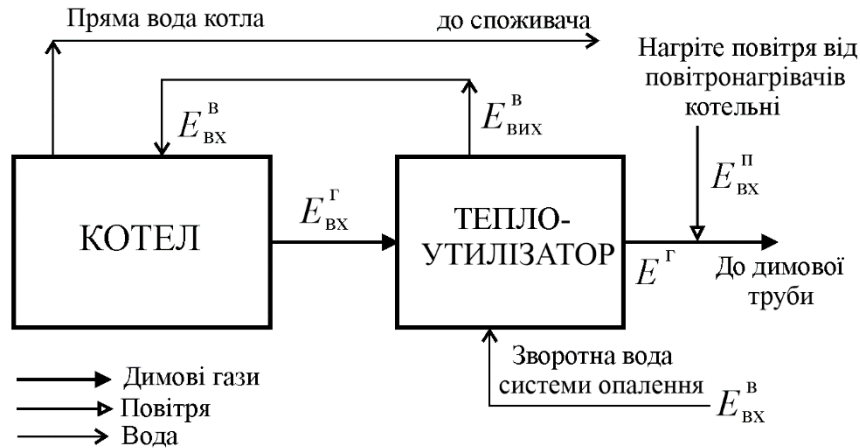
В даній роботі проведено аналіз ексергетичної ефективності теплоутилізаційної системи з повітряним тепловим методом антикорозійного захисту газовідвідних трактів. В рамках виконаного аналізу розроблено структурну схему котельної установки з цим методом з ідентифікацією ексергетичних потоків між окремими елементами структури. Відповідно до структурної схеми складено інтегральне балансове рівняння для визначення критеріїв оцінки ефективності теплоутилізаційної системи з повітряним тепловим методом захисту газовідвідних трактів котельних установок. Розраховано ексергетичні характеристики, що входять до критеріїв оцінки ефективності, та встановлено залежності ексергетичних характеристик від

параметрів зазначеного методу. Визначено оптимальні області зміни параметрів відповідної теплоутилізаційної системи.

Ексергетичний аналіз системи теплоутилізації виконано для газоспоживальних котельних установок з теплопродуктивністю котла 2 МВт. В теплоутилізаційній системі котельної установки реалізовано один з теплових методів антикорозійного захисту газовідвідних трактів котельних установок – повітряний метод. Сутність методу полягає у підмішуванні в димові гази після теплоутилізатора частини нагрітого повітря від повітронагрівача котельні, що забезпечує зниження відносної вологості газів і точки роси та підвищення їхньої температури. Це запобігає утворенню конденсату на поверхні газовідвідних трактів. Подальше підігрівання газів після теплоутилізатора і відповідне зменшення їхньої відносної вологості здійснюється в поверхневому теплообміннику (газопідігрівачі). Для підігрівання газів використовується теплота прямої води котла або частини газів, відібраних перед теплоутилізатором.

Для аналізу ексергетичної ефективності теплоутилізаційної системи з повітряним тепловим методом захисту застосовано комплексну методику, яка включає структурно-варіантні методи, інтегральні балансові методи ексергетичного аналізу та вибір ексергетичних критеріїв оцінки ефективності. Методика передбачає високу точність отриманих результатів, в середньому, 0,4%. В рамках комплексної методики розроблено структурну схему теплоутилізаційної системи з повітряним тепловим методом захисту газовідвідних трактів котельних установок (мал.1).

В структурній схемі котельної установки з повітряним тепловим методом захисту газовідвідних трактів відображено ексергетичні потоки між окремими елементами структури.



Малюнок 1. Структурна схема котельної установки з повітряним тепловим методом захисту газовідвідних трактів

Ексергетичними критеріями оцінки ефективності теплоутилізаційної системи з повітряним тепловим методом захисту слугували ексергетичні втрати $E_{вт}$ та тепло-ексергетичний критерій ефективності $\varepsilon = E_{вт}/Q$, який показує рівень ексергетичних втрат на одиницю теплової потужності системи, де Q – теплова потужність.

На основі структурної схеми з урахуванням ексергетичних потоків між окремими елементами структури складено ексергетичне балансове рівняння

$$E_{вт} = G^z c_p^z (T_{ex}^z - T_{вих}^z) - T_c G^z c_p^z \ln(T_{ex}^z / T_{вих}^z) - T_c G^z R / \mu^z \ln(p_{ex}^z / p_{вих}^z) - G^n c_p^n (T_{ex}^n - T_c \ln T_{ex}^n) - T_c G^n c_p^n R / \mu^n \ln p_{ex}^n - G^g (h_{ex}^g - T_c s_{ex}^g) + G^g (h_{вих}^g - T_c s_{вих}^g)$$

де c_p – питома теплоємність; G – витрати теплоносія; h – питома ентальпія; p – тиск; R – універсальна газова стала; s – питома ентропія; T – абсолютна температура; μ – молекулярна маса;. Індекси верхні: z, v, n – димові газы, вода, повітря. Індекси нижні: $вх, вих$ – вхід, вихід; c – навколишнє середовище.

Для розрахунку ексергетичних критеріїв оцінки ефективності використано комплексну методику, яка включає аналіз структурної схеми котельної установки з повітряним тепловим методом захисту газовідвідних трактів, аналіз ексергетичного балансового рівняння та вихідні дані, які наведено в таблиці 1. (Тут N – кількість підмішуваного повітря).

**Таблиця 1. Вихідні дані для розрахунку ексергетичних втрат та тепло-
ексергетичного критерія ефективності**

$Q, \text{кВт}$	$N, \%$	T_{ex}^e, K	$T_{вих}^e, \text{K}$	T_{ex}^e, K	$T_{вих}^e, \text{K}$	T_{ex}^n, K
62,2	0	425,3	342,8	330,0	331,3	520
62,2	4	425,3	349,4	330,0	331,3	520
62,2	8	425,3	355,6	330,0	331,3	520
62,2	12	425,3	361,4	330,0	331,3	520
62,2	16	425,3	366,7	330,0	331,3	520
85,4	0	430,0	334,2	318,6	320,4	520
85,4	4	430,0	341,2	318,6	320,4	520
85,4	8	430,0	347,7	318,6	320,4	520
85,4	12	430,0	353,7	318,6	320,4	520
85,4	16	430,0	359,4	318,6	320,4	520
90,7	0	417,0	323,8	305,0	307,2	520
90,7	4	417,0	331,2	305,0	307,2	520
90,7	8	417,0	338,1	305,0	307,2	520
90,7	12	417,0	344,5	305,0	307,2	520
90,7	16	417,0	350,5	305,0	307,2	520

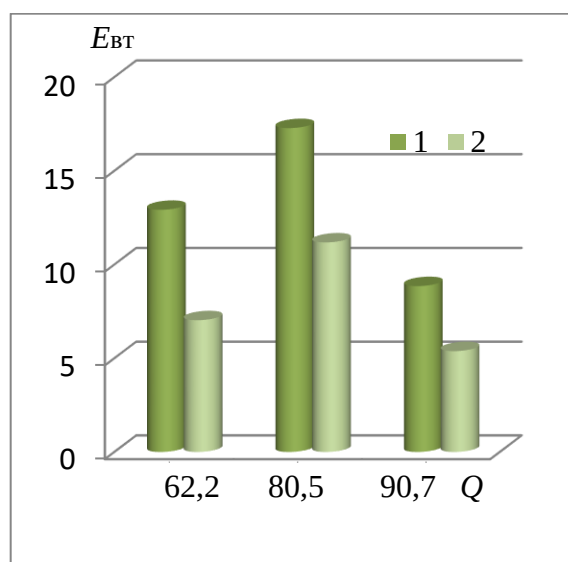
Отримано величини зміни ексергії димових газів та води в теплоутилізаційній системі при реалізації повітряного методу та ексергетичні критерії оцінки ефективності теплоутилізаційної системи при збільшенні кількості підмішуваного повітря N . Для прикладу в табл. 2 і мал. 2 наведено результати розрахунків для деяких значень теплової потужності теплоутилізатора Q (Тут Δ – зміна величини).

Згідно з отриманими даними найбільший вплив на ексергетичні критерії оцінки ефективності E_{em} і ϵ мають рівень та різниця температур теплоносіїв на вході і виході з теплоутилізатора, витрата теплоносіїв, вологовміст димових газів. Характер і ступінь впливу зазначених параметрів різна і залежить від теплопродуктивності котла, пов'язаного з його тепловим навантаженням. Загальна тенденція збільшення ексергетичних втрат внаслідок зниження температури та збільшення витрати відхідних газів, а також зниження

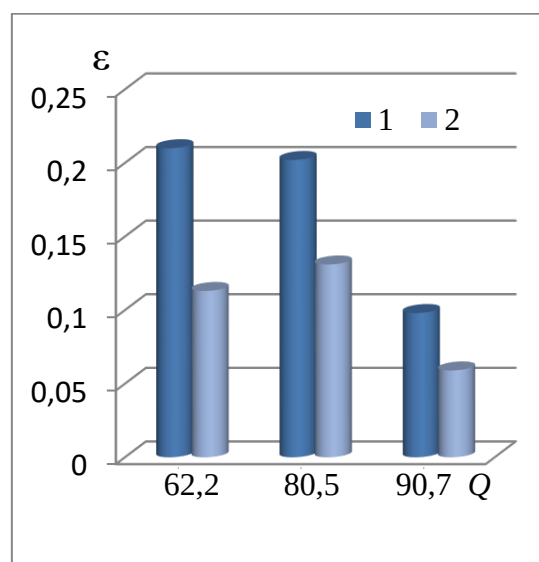
температури води після теплоутилізатора при зменшенні теплового навантаження котла порушується при переведенні котлів в номінальний режим роботи внаслідок зменшення загального числа котлів, що працюють.

Таблиця 2. Результати розрахунку змін ексергії димових газів та води в теплоутилізаційній системі при реалізації повітряного методу антикорозійного захисту

Q , кВт	62,2	62,2	62,2	62,2	62,2	90,7	90,7	90,7	90,7	90,7
N , %	0	4	8	12	16	0	4	8	12	16
ΔE^z , кВт	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
ΔE^e , кВт	19,9	18,4	16,9	15,5	14,1	13,8	13,0	12,1	11,2	10,3



а)



б)

Малюнок 2. Критерії ефективності теплоутилізаційної системи з повітряним тепловим методом захисту газовідвідних трактів:

- а) ексергетичні втрати $E_{вт}$, б) тепло-ексергетичний критерій ефективності ϵ : 1- за відсутності підмішуваного повітря;
2 - кількість підмішуваного повітря $N=16\%$**

При реалізації повітряного методу величина зміни ексергії води ΔE^e при незмінній теплопродуктивності теплоутилізатора Q залишається сталою, а

втрати ексергії $E_{\text{вт}}$ і зміни тепло-ексергетичного критерію ε залежать від величини зміни ексергії димових газів ΔE^{ε} (табл. 1). Внаслідок підмішування в димові гази після теплоутилізатора частини нагрітого повітря відбувається підвищення на виході з теплоутилізатора температури суміші димових газів і повітря, збільшення витрати суміші і зменшення її вологовмісту. Підвищення температури суміші зменшує величину зміни ексергії димових газів, а збільшення витрати суміші і зменшення вологовмісту збільшує величину зміни ексергії димових газів за інших рівних умов. Спільний вплив зазначених параметрів має наступні результати. При підвищенні обсягів підмішуваного повітря для всіх значень теплопродуктивності теплоутилізатора втрати ексергії і значення тепло-ексергетичного критерію зменшуються. При теплопродуктивності теплоутилізатора $Q = 90,7 \text{ кВт}$ зазначені критерії ефективності мають найменші значення, тобто ексергетична ефективність системи при реалізації розглянутого теплового методу у цьому разі найвища.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в застосуванні комплексної методики, яка включає структурно-варіантні, інтегральні балансові методи ексергетичного аналізу та необхідні ексергетичні критерії, для оцінки ефективності теплоутилізаційної системи з підмішуванням в димові гази після теплоутилізатора частини нагрітого повітря. Практична цінність пов'язана з можливістю використання отриманих результатів при проектуванні теплоутилізаторів для конкретних схем утилізації теплоти енергетичних установок.