

П.П. Куделя⁽¹⁾, канд. техн. наук, доц.; ORCID 0000-0003-4941-5795
С.В. Дубовський⁽²⁾, д-р. техн. наук, ст. наук. співр.; ORCID 0000-0001-9418-2092

⁽¹⁾ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

⁽²⁾ Інститут технічної теплофізики НАН України

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ І ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТИПОВИХ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ

Викладено основні особливості енергетичного та ексергетичного методів аналізу ефективності енергетичних перетворень в типових системах опалення (котельні, електроопалення, теплові насоси з електроприводом). Складено рівняння енергетичних та ексергетичних балансів систем та їх елементів. На їх основі одержано вирази для обчислення показників ефективності. Приведено результати розрахунків і зіставлення коефіцієнтів перетворення енергії (COP - Coefficient of Performance) і ексергетичних ККД (Exergy Efficiency або Second Law Efficiency). Показано, що системи опалення на основі паливних котлів та електронагрівачів, характеризуються високими значеннями COP, що не орієнтує на вжиття заходів щодо їх удосконалення. В той же час, такі системи мають доволі низькі значення ексергетичного ККД. Показано, що ексергетичний ККД типової системи електроопалення досягає близько 3% а опалення на основі паливних котельних – близько 6,5%. Виконано аналіз основних причин термодинамічних необоротностей в означених системах. Наведено діаграму змін ексергетичної ефективності в послідовних елементах типової системи опалення на прикладі паливної котельні. Показано, що у паливному котлі основні необоротності виникають на стадіях горіння та теплопередачі за великої різниці температур. У системах електроопалення основні ексергетичні втрати виникають при виробництві електричної енергії на ТЕС та під час перетворення електричної енергії у теплоту в електронагрівачі. Розглянуто можливості та основні шляхи зниження термодинамічної необоротності системи опалення від парової котельні при її переобладнанні у міні – ТЕЦ. Виконано аналіз термодинамічних втрат в системах теплонасосного опалення. Визначені умови, за яких такі системи стають більш енергетично ефективними ніж системи на основі паливних котлів. Розкриті причини широкого практичного застосування котельних і електроопалення, не дивлячись на їх низьку термодинамічну досконалість.

Ключові слова: системи опалення, аналіз за Другим законом термодинаміки, котельня, електроопалення, тепловий насос, ексергетичний ККД.

Вступ. На сьогодні переважають два підходи до ефективного використання енергії – енергетичний та ексергетичний [1]. Енергетичний підхід базується на Першому законі термодинаміки – Законі збереження енергії, ексергетичний – на спільному застосуванні двох основних законів термодинаміки - Першого та Другого до технічних задач. Такі підходи пов'язані з використанням двох термодинамічних характеристик енергії – кількості і якості : кількості в енергетичному, обох – в ексергетичному [1-5].

За Першим законом можливе лише перетворення одних форм енергії в інші з додержанням балансу кількості енергії (енергетичного балансу). Розвиток науки і техніки змусив враховувати не лише кількість, а і якість енергії. Основна якісна характеристика енергії – це здатність до перетворень [6]. Для визначення кількісної міри якості енергії знадобились рівняння Першого закону – енергетичний баланс і Другого – ентропійний. В результаті їх спільного рішення було одержано загальну міру якості, яка одержала назву «ексергія» і врахувала як якісну характеристику енергії, так і кількісну.

Друга складова енергії – анергія до перетворень в інші форми енергії не здатна, це баласт що в необмеженій кількості є в навколишньому середовищі. Для одержання ексергії необхідні цінні природні ресурси. Затрати ексергії потребують всі технічні процеси для їх реалізації.

На понятті ексергії засновується ексергетичний баланс і ексергетичний метод аналізу енергоперетворюючих процесів. Всі застосування ексергетичного методу спираються на той незаперечний факт, що в енергоперетворюючих процесах енергія водночас і зберігається (Перший закон) і деградує, знижуючи свою якість внаслідок прояву необоротностей (Другий закон).

Всі реальні процеси є необоротними і кожна необоротність призводить до незворотних втрат ексергії. Кожна ексергетична втрата приводить до збільшення споживання приводної ексергії або до зменшення корисного ефекту процесу.

Отже значення має не стільки кількість енергії сама по собі, оскільки вона зберігається, а лише здатність даної кількості енергії змінювати свою якість в реальних процесах. Звідси випливає, що раціональне використання енергії зводиться у кінцевому рахунку до збереження ексергії, до боротьби проти необоротностей. Наше завдання – навчитись економічно розпоряджатись якістю енергії – ексергією

[7,8]. Введення поняття ексергії дозволило застосовувати до всіх форм енергії єдину якісну характеристику і ввести універсальне визначення коефіцієнта корисної дії (ККД) як відношення якісно однорідних величин – ексергій [1]. Такий ККД, змінюючись у межах 0-1, що цілком логічно, показує ступінь наближення до термодинамічно ідеального процесу і називається ексергетичним ККД (в англійській літературі – Exergy Efficiency або Second Law Efficiency). Коефіцієнти ефективності перетворення енергії, в яких якість енергії не враховується, почали називати в англійській літературі Coefficient of Performance, (скорочено - COP, дослівно – коефіцієнт виконання), у вітчизняній літературі – коефіцієнт перетворення енергії (КПЕ), раніше – енергетичний ККД. Загальний ексергетичний підхід до визначення ККД не виключає використання COP. Значення COP дає корисну для практики інформацію, показуючи кількісно, скільки корисної енергії одержується чи споживається на одиницю затраченої, тобто як система виконує своє призначення. Разом з тим, COP невірно відображає рівень досконалості енергоперетворюючих процесів, оскільки при визначенні COP якість енергії не береться до уваги. Ексергетичний ККД все в більшій мірі використовується як в теоретичних роботах, так і на практиці в енергетиці та інших пов'язаних з нею галузях.

Мета та завдання досліджень. В даній роботі використовується як ексергетичний підхід, так і енергетичний до аналізу перетворення енергії в типових системах опалення і відповідні показники ефективності – ексергетичний ККД і COP (КПЕ). Аналізуються три типові системи опалення: з використанням паливного котла; теплових насосів та електричної енергії в якості джерела теплоти.

Матеріал і результати досліджень.

1. Паливні котельні

Принципову схему опалення від паливної котельні показано на рис. 1

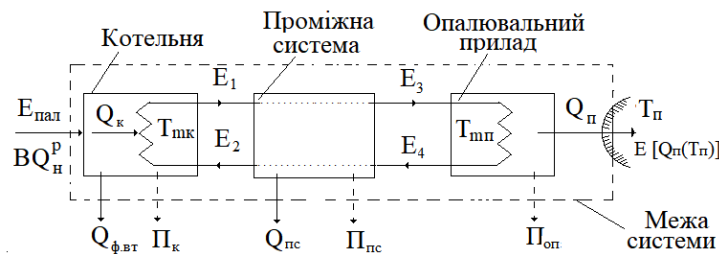


Рисунок 1 - Схема опалення від котельні.

На схемі прийняті такі позначення : T_{mk} , $T_{мп}$ - середні температури теплоносія, відповідно, при підведенні теплоти в котлі та відведення її в опалювальному приладі; Q_k – підведена до теплоносія теплота в котлі; Q_n – відведена теплота від теплоносія в опалювальному приладі; P_k - втрати ексергії в котлі, серед яких найважливіші – це необоротний процес спалювання палива і необоротний теплообмін між продуктами згоряння і теплоносієм; $P_{пс}$ – необоротні втрати в проміжній системі (ПС); $P_{оп}$ - необоротність в опалювальному приладі, пов'язана з теплообміном між теплоносієм і повітрям в приміщенні; $Q_{пс}$ - втрата теплоти в ПС; $Q_{ф.вт}$ - фізичні втрати теплоти в котлі; $E_{пал}$ - ексергія палива; E - ексергія потоків теплоносія.

Системи опалення від котельні складається з трьох елементів: котельні, проміжної підсистеми і опалювальних приладів приміщення. Проміжна підсистема (ПС) –це все, що знаходиться між котельнею і опалювальними приладами (теплові мережі, теплові пункти, насоси, змішувальні вузли і т. ін.). В цій підсистемі приймаємо до уваги всі необоротності (теплообмін, змішування, тертя, втрати теплоти в навколишнє середовище. Втрати ексергії в процесі протікання теплоносіїв з тертям через котел (процес 1-2) і опалювальний прилад (процес 3-4) відносно малі на відміну від інших і тому не враховуються в аналізі. У цьому випадку (нехтування тертям) ексергетичні баланси для процесів 1-2 і 3-4 записуються так:

$$E_1 - E_2 = E[Q_k(T_{mk})] \tag{1}$$

$$E_3 - E_4 = E[Q_n(T_{мп})] \tag{2}$$

Енергетичний аналіз

Рівняння всієї системи опалення від котельної, як впливає з рис.1, має вигляд:

$$BQ_n^p = Q_n + Q_{ф.вт} + Q_{пс} \tag{3}$$

Звідси загальний коефіцієнт перетворення енергії системи $\eta_{ку}$ (енергетична ефективність) визначається співвідношенням:

$$\eta_{ку} = \frac{Q_n}{BQ_n^p} = \frac{Q_k}{BQ_n^p} \cdot \frac{Q_n}{Q_k} = \eta_{кот} \eta_{пс} \tag{4}$$

COP (енергетичний ККД $\eta_{кот}$) сучасних опалювальних котлів наближається до 100% , а тому значення $\eta_{кот}$ не орієнтує на покращення енергетичної ефективності системи опалення від котельної.

Ексергетичний аналіз

При нехтуванні втратами ексергії від тертя в процесах 1-2 та 3-4 схему ексергетичного балансу у відповідності з рис.2 можна подати у такій формі :

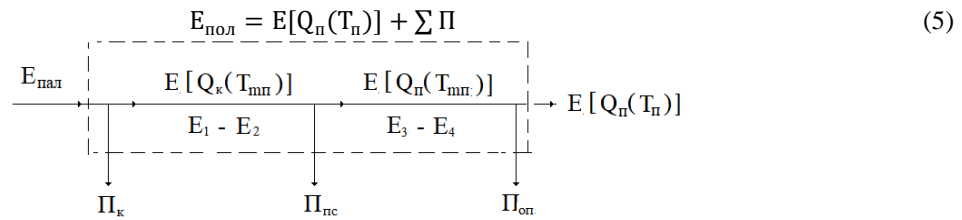


Рисунок 2 – Схема ексергетичного балансу системи опалення від котельні

Для ексергетичного ККД всієї системи маємо:

$$\eta_{\text{ку}}^{\text{ex}} = \frac{E[Q_{\text{п}}(T_{\text{п}})]}{E_{\text{пал}}} = \frac{E[Q_{\text{к}}(T_{\text{к}})]}{E_{\text{пал}}} \cdot \frac{E[Q_{\text{п}}(T_{\text{мп}})]}{E[Q_{\text{к}}(T_{\text{к}})]} \cdot \frac{E[Q_{\text{п}}(T_{\text{п}})]}{E[Q_{\text{п}}(T_{\text{мп}})]} = \eta_{\text{кот}}^{\text{ex}} \eta_{\text{пс}}^{\text{ex}} \eta_{\text{оп}}^{\text{ex}} \quad (6)$$

де $\eta_{\text{кот}}^{\text{ex}}$ – ексергетичний ККД котла:

$$\eta_{\text{кот}}^{\text{ex}} = \frac{Q_{\text{к}} \tau_{\text{мк}}}{Ve} = \frac{Q_{\text{к}}}{B Q_{\text{н}}^{\text{p}}} \tau_{\text{мк}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{p}}}{e} \eta_{\text{кот}} \tau_{\text{мк}} \quad (7)$$

$\eta_{\text{пр}}^{\text{ex}}$ – ексергетичний ККД проміжної підсистеми (транспортування та розподілу):

$$\eta_{\text{пр}}^{\text{ex}} = \frac{E[Q_{\text{п}}(T_{\text{мп}})]}{E[Q_{\text{к}}(T_{\text{к}})]} = \frac{Q_{\text{п}} \tau_{\text{мп}}}{Q_{\text{к}} \tau_{\text{к}}} = \eta_{\text{пс}} \frac{\tau_{\text{мп}}}{\tau_{\text{к}}} \quad (8)$$

$\eta_{\text{оп}}^{\text{ex}}$ – ексергетичний ККД опалювального приладу:

$$\eta_{\text{оп}}^{\text{ex}} = \frac{E[Q_{\text{п}}(T_{\text{п}})]}{E[Q_{\text{п}}(T_{\text{мп}})]} = \frac{Q_{\text{п}} \tau_{\text{п}}}{Q_{\text{п}} \tau_{\text{мп}}} = \frac{\tau_{\text{п}}}{\tau_{\text{мп}}} \quad (9)$$

В виразі (7) для ексергетичного ККД котла відношення $\frac{Q_{\text{н}}^{\text{p}}}{e} < 1$, оскільки хімічна ексергія органічного палива (e) є більшою, ніж його нижча робоча теплота згоряння ($Q_{\text{н}}^{\text{p}}$); по даним [8] відношення $\frac{Q_{\text{н}}^{\text{p}}}{e}$ складає близько 0,93 для кам'яного вугілля і 0,97 для природного газу. В оціночних розрахунках часто приймають $\frac{Q_{\text{н}}^{\text{p}}}{e} \approx 1$.

Ексергетичний ККД котлів $\eta_{\text{кот}}^{\text{ex}}$ залежить від параметрів мережної води $\tau_{\text{мк}} = 1 - \frac{T_o}{T_{\text{мк}}}$. Так, при температурі води, підведеної у теплову мережу від водогрійної котельні, $t_2 = 80^{\circ}\text{C}$ і температурі у зворотній лінії $t_1 = 35^{\circ}\text{C}$, середня термодинамічна температура теплоносія $T_{\text{мк}} = 330\text{K}$, тоді при спалюванні природного газу ($\eta_{\text{кот}} = 0,85$) маємо: $\eta_{\text{кот}}^{\text{ex}} = \eta_{\text{кот}} \tau_{\text{мк}} = 0,85 \cdot (1 - 270/330) = 0,85 \cdot 0,18 = 0,15$ або 15%. Низькі значення ексергетичного ККД водогрійних котельнь зумовлені: 1) необоротністю від згоряння палива і 2) необоротністю теплообміну між продуктами згоряння і мережною водою (процес 1-2). Хоча $\eta_{\text{кот}}^{\text{ex}}$ залежить від параметрів теплоносія, загальний ексергетичний ККД системи опалення $\eta_{\text{ку}}^{\text{ex}}$, як буде показано нижче, від них не залежить. Для ексергетичного ККД опалювального приладу $\eta_{\text{оп}}^{\text{ex}} = \frac{\tau_{\text{п}}}{\tau_{\text{мп}}}$ при $T_{\text{п}} = 293\text{K}$, $T_{\text{мп}} = 330\text{K}$ і $T_o = 270\text{K}$ $\tau_{\text{п}} = 1 - \frac{T_o}{T_{\text{п}}} = 1 - \frac{273}{293} = 0,08$; $\tau_{\text{мп}} = 1 - \frac{T_o}{T_{\text{мп}}} = 1 - \frac{273}{330} = 0,18$; $\eta_{\text{оп}}^{\text{ex}} = \frac{\tau_{\text{п}}}{\tau_{\text{мп}}} = \frac{0,08}{0,18} = 0,44$. Загальний ексергетичний ККД системи опалення від котельні за рахунок значних необоротностей у котлі виходить дуже низьким. У нашому прикладі

$$\eta_{\text{ку}}^{\text{ex}} = \eta_{\text{кот}}^{\text{ex}} \eta_{\text{пс}}^{\text{ex}} \eta_{\text{оп}}^{\text{ex}} = 0,15 \cdot 0,98 \cdot 0,44 = 0,065 \text{ або } 6,5\%.$$

До передачі теплоти робочому тілу втрата ексергії визначається, в основному, втратою від згоряння палива. Ексергетичний ККД цієї стадії можемо оцінити за формулою:

$$\eta_{\text{згор}}^{\text{ex}} = \frac{E[Q(T_{\text{г}})]}{E} = \frac{Q_{\text{г}} \tau_{\text{г}}}{E} = \frac{B Q_{\text{н}}^{\text{p}} \eta_{\text{кот}} \tau_{\text{г}}}{Ve} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{p}}}{e} \eta_{\text{кот}} \tau_{\text{г}} \quad (10)$$

Прийняв температуру горіння $T_{\text{г}} = 1473\text{K}$ ($t_{\text{г}} = 1200^{\circ}\text{C}$), $T_o = 270\text{K}$, СОР котла $\eta_{\text{кот}} = 0,85$, для природного газу маємо: $\eta_{\text{згор}}^{\text{ex}} = 0,97 \cdot 0,85 \cdot 0,82 = 0,68$. Діаграма потоків ексергії при опаленні від котельні показана на рис. 3.

Загальний ексергетичний ККД системи опалення, котра включає котельню, проміжну систему і опалювальний прилад, дорівнює:

$$\eta_{\text{ку}}^{\text{ex}} = \eta_{\text{кот}}^{\text{ex}} \eta_{\text{пс}}^{\text{ex}} \eta_{\text{оп}}^{\text{ex}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{p}}}{e} \eta_{\text{кот}} < \eta_{\text{кот}} \tau_{\text{п}}(T_{\text{п}}) < \tau_{\text{п}}(T_{\text{п}}) \quad (11)$$

З цього виразу видно, що в явному вигляді $\eta_{\text{оп}}^{\text{ex}}$ не впливає на загальний ККД системи. Опосередковано опалювальний прилад може, в принципі, впливати лише на $\eta_{\text{кот}}$ через температуру зворотної води, яка поступає у мережу після ОП. В традиційних котлах (конденсація водяної пари продуктів згоряння відсутня) температура зворотної води майже не впливає на $\eta_{\text{кот}}$ [8,9]. Тоді на основі (11) можна зробити висновок, що зменшення втрат ексергії в одній частині, наприклад в ОП, викликає у другій частині її відповідне збільшення. При цьому сумарна втрата ексергії в трьох підсистемах практично не змінюється, як і $\eta_{\text{ку}}^{\text{ex}}$. В конденсаційних котлах, навпаки, з пониженням температури зворотної води нижче температури точки роси $\eta_{\text{кот}}$ зростає і може досягти 104-106% [9].



Рисунок 3 – Діаграма потоків ексергії при опаленні від котельні.

Отже, робота конденсаційного котла з низькоенергетичними опалювальними приладами, окрім підвищення комфорту в приміщенні, приводить до економії палива, а отже доцільна [10]. Для підтримання температури теплоносія у зворотному трубопроводі на заданому рівні в конденсаційних котлах доцільне кількісне регулювання корисної теплової потужності. В сучасних традиційних котлах вдається досягнути значень коефіцієнта перетворення (COP) до 95%. Однак низькі значення ексергетичного ККД ($< \tau_p(T_p)$) цих котлів вказує на те, що дана опалювальна система неефективна.

2. Удосконалювання систем опалення на базі парових котельень

Одним з шляхів підвищення економічної ефективності систем теплопостачання є збільшення комбінованого виробництва теплоти та електроенергії в області невеликих теплових навантажень, які традиційно покриваються різними котельнями. Стан багатьох котельних характеризується значним фізичним спрацюванням устаткування і будівельних конструкцій, тому вони підлягають суттєвій реконструкції, яку можна провести з встановленням у них різних двигунів для комбінованого виробництва електроенергії і теплоти (міні – ТЕЦ).

В парових котельнях у якості двигунів можуть бути встановлені парові турбіни з протитиском, газотурбінні та дизельні установки. Парові турбіни можуть застосовуватися при наявності в котельнях парових котлів низького тиску (1,0- 1,4 МПа), працюючих на мережні підігрівачі. У випадку встановлення парової турбіни в котельні може бути застосована схема, наведена на рис. 4.

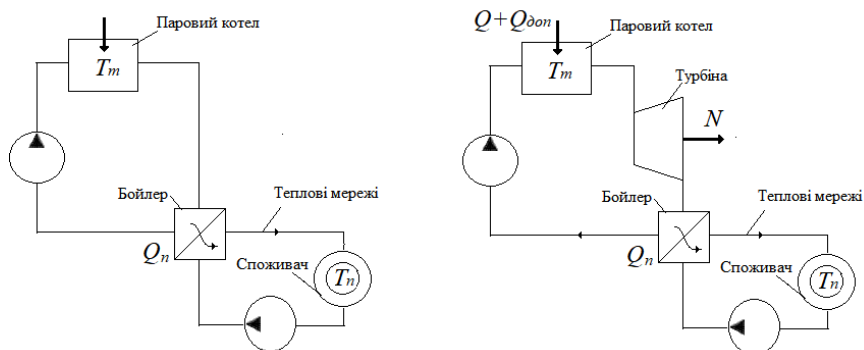


Рисунок 4 - Схеми теплопостачання від КУ і міні - ТЕЦ на базі парової котельні.

Спробуємо оцінити за допомогою поняття ексергетичних втрат різницю між опаленням парою (опалювальна парова котельня) і теплофікацією (міні-ТЕЦ на базі котельні) з використанням схем ексергетичного балансу, поданих на рис.5.

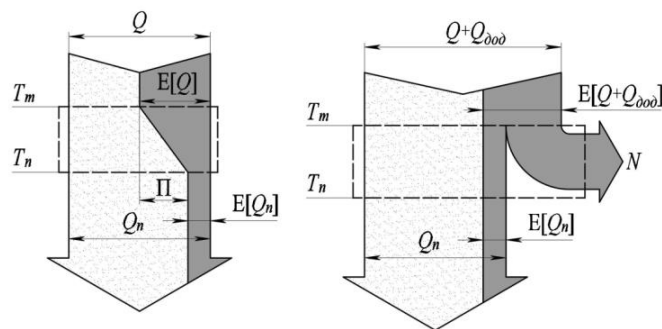


Рисунок 5 - Схеми ексергетичного балансу КУ та міні-ТЕЦ.

Енергетичні баланси при однакових Q_n :

$$KY \rightarrow Q = Q_n; \text{ міні - ТЕЦ} \rightarrow Q + Q_{\text{дод}} = N + Q_n \quad (12)$$

Ексергетичні баланси:

$$KY \rightarrow E[Q(T_m)] = E[Q_n(T_n)] + \Pi \quad (13)$$

$$\text{Міні - ТЕЦ} \rightarrow E[Q + Q_{\text{дод}}] = N + E[Q_n(T_n)] \quad (14)$$

З рівняння енергетичного балансу для КУ та міні - ТЕЦ витікає, що на виробництво теплофікаційним потоком пари потужності N додатково витрачається (у порівнянні з КУ) кількість теплоти, яка дорівнює:

$$Q_{\text{дод}} = N \quad (15)$$

Звідси можна зробити невірний висновок про те, що додатково витрачена теплота дає можливість одержати роботу з ефективністю 100% незалежно від досконалості процесів у турбіні. В дійсності, за якістю (ексергією) величини $Q_{\text{дод}}$ та N різні, при цьому теплота Q також бере участь у перетворенні теплоти в роботу.

Відповідно до ексергетичних балансів КУ та міні - ТЕЦ, перехід від опалення гострою парою до опалення відпрацьованою парою дає додаткову роботу, рівну N , але для цього вимагає додаткової витрати ексергії, рівної:

$$E_{\text{доп}} = E[Q + Q_{\text{дод}}] - E[Q] = N - \Pi \quad (16)$$

Звідси витікає, що N більше додаткової витрати ексергії $E_{\text{доп}}$ на величину Π . Іншими словами, вигравш від теплофікації дорівнює Π . У чому ж причина зникнення Π при переході до теплофікації? При опаленні гострою парою існує кінцева різниця температур між гарячою парою (середня термодинамічна температура T_m) та опалюваним приміщенням T_n , що обов'язково веде до виникнення ексергетичної втрати Π . Може виникнути питання, чому не можна одержати $\Pi=0$ у котельні, якщо знизити параметри гострої пари так, щоб вона віддавала теплоту при температурі, близької до T_n . Тут варто врахувати, що зниження параметрів гострої пари, як було показано раніше, викликає збільшення втрат ексергії в котлі на величину Π . Отже, зазначені втрати ексергії не можна усунути в принципі (власні втрати системи тепlopостачання від КУ).

В ідеалізованій міні-ТЕЦ, якщо не брати до уваги втрати в проміжній системі та опалювальному приладі, температура відпрацьованої пари збігається з температурою у приміщенні, що опалюється, тому $\Pi = 0$. Отже, енергетична сутність опалення шляхом теплофікації (відпрацьованою у турбіні парою) полягає у зменшенні (а в ідеальній міні-ТЕЦ – у знищенні) тих втрат ексергії, які в котельні проявляються при опаленні гострою парою внаслідок необоротності теплообміну між температурними рівнями T_m і T_n .

У міні-ТЕЦ енергетично вигідно, на відміну від КУ, підвищувати параметри гострої пари (зменшується необоротність теплообміну між продуктами згоряння та робочим тілом у котлі без помітної зміни внутрішніх необоротностей у силовому циклі).

У реальній ТЕЦ для зменшення необоротності між гріючою парою у мережевому підігрівачі (бойлері) та середовищем у приміщенні виправдане (а у випадку КУ – ні) застосування низькотемпературних опалювальних приладів (ОП), які мають більшу робочу поверхню. При цьому досягається зниження температури теплоносія в ОП за рахунок зменшення температурного напору, відповідно до рівняння $Q_n = kF\Delta t$ ($Q_n = \text{idem}, F \uparrow, \Delta t \downarrow$), що дозволяє знизити параметри пари, що відбирається з турбіни, і, як наслідок, збільшити виробництво N . Таким чином, чим вище параметри гострої пари і нижче - пари, що відбирається з турбіни при тому ж Q_n , тим менше втрати ексергії і більше виробництво N енергетично ефективним комбінованим способом.

3. Електроопалення

Відповідно до схеми перетворення енергії в системі електроопалення (ОП) (рис. 6) коефіцієнт перетворення енергії (COP) системи визначається за формулою:

$$\eta_{\text{ео}} = \frac{N_{\text{тес}}}{BQ_n^p} \cdot \frac{N_{\text{ел}}}{N_{\text{тес}}} \cdot \frac{Q_n}{N_{\text{ел}}} = \eta_{\text{тес}} \eta_{\text{леп}} \eta_{\text{оп}}$$

де $\eta_{\text{тес}} = \frac{N_{\text{тес}}}{BQ_n^p}$ - енергетична ефективність (COP) виробництва електричної енергії на ТЕС, $\eta_{\text{леп}}$ - COP лінії електропередачі (ЛЕП), ($\eta_{\text{тес}} = 0,36 - 0,4$; $\eta_{\text{леп}} = 0,95$ [5]); COP електронагрівача (опалювального приладу – ОП) $\eta_{\text{оп}} = \frac{Q_n}{N_{\text{ел}}} = 1$, або 100%, (загальний COP всієї системи $\eta_{\text{ео}} = 0,38 \cdot 0,95 \cdot 1 = 0,35$, або 35%).

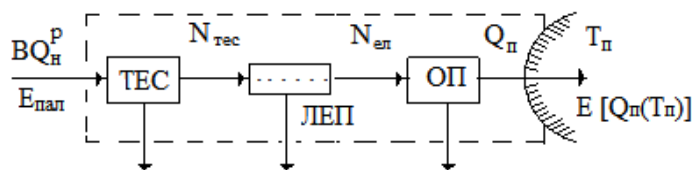


Рисунок 6 – Принципова схема системи електричного опалення.

Для загального ексергетичного ККД системи $\eta_{\text{ео}}^{\text{екс}}$ можна одержати (рис.6):

$$\eta_{\text{ео}}^{\text{екс}} = \frac{E_{\text{п}}}{E_{\text{пал}}} = \frac{E[Q_{\text{п}}(T_{\text{п}})]}{E_{\text{пал}}} = \frac{N_{\text{тес}}}{E_{\text{пал}}} \cdot \frac{N_{\text{ел}}}{N_{\text{тес}}} \cdot \frac{E_{\text{п}}}{N_{\text{ел}}} = \eta_{\text{тес}}^{\text{екс}} \cdot \eta_{\text{леп}}^{\text{екс}} \cdot \eta_{\text{оп}}^{\text{екс}} \quad (17)$$

Енергія палива на ТЕС перетворюється в електричну енергію з ексергетичним ККД

$$\eta_{\text{тес}}^{\text{екс}} = \frac{N_{\text{тес}}}{E_{\text{пал}}} = \frac{N_{\text{тес}}}{BQ_{\text{н}}^{\text{п}}} \cdot \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}}}{e}$$

Ексергетичний ККД виробництва й передачі електричної енергії становить

$\eta_{\text{тес}}^{\text{екс}} \eta_{\text{леп}}^{\text{екс}} \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}}}{e} = 0,38 \cdot 0,95 \cdot 0,97 = 0,35$, або 35%. Таким чином, у нашому прикладі електроенергія, що підводиться до ОП, в ексергетичному балансі складає лише 35% ексергії палива, внаслідок досить значних втрат ексергії в джерелі електроенергії – ТЕС.

Споживачу (у приміщенні) надходить ексергія $E[Q_{\text{п}}(T_{\text{п}})] = E_{\text{п}} = Q_{\text{п}} \tau_{\text{п}}$. Оскільки $Q_{\text{п}} = N_{\text{ел}}$, то для ексергетичного ККД опалювального приладу маємо:

$$\eta_{\text{оп}}^{\text{екс}} = \frac{E_{\text{п}}}{N_{\text{ел}}} = \frac{Q_{\text{п}} \tau_{\text{п}}}{Q_{\text{п}}} = \tau_{\text{п}} \quad (18)$$

У нашому прикладі при $T_{\text{п}} = 293\text{K}$ і $T_0 = 270\text{K}$, $\eta_{\text{оп}}^{\text{екс}} = \tau_{\text{п}} = 0,08$, або 8%.

Електронагрівач служить типовим прикладом реалізації необоротного нагріву. При цьому використовується чиста ексергія, з якої виробляється в необоротному процесі енергія. COP електронагрівача ($\eta_{\text{оп}} = 100\%$) не розкриває термодинамічну недосконалість цього способу опалення.

Загальний ексергетичний ККД розглядаємої системи опалення, що включає джерело електропостачання (у нашому випадку ТЕС), буде дорівнювати:

$$\eta_{\text{ео}}^{\text{екс}} = \eta_{\text{тес}}^{\text{екс}} \eta_{\text{леп}}^{\text{екс}} \eta_{\text{оп}}^{\text{екс}} = \eta_{\text{тес}}^{\text{екс}} \eta_{\text{леп}}^{\text{екс}} \tau_{\text{п}} = \eta_{\text{тес}}^{\text{екс}} \eta_{\text{леп}}^{\text{екс}} \tau_{\text{п}} = \eta_{\text{ео}}^{\text{екс}} \tau_{\text{п}} < \tau_{\text{п}}, \quad (19)$$

оскільки $\eta_{\text{леп}}^{\text{екс}} = \eta_{\text{леп}}$ і при $E_{\text{пал}} = BQ_{\text{н}}^{\text{п}}$ $\eta_{\text{тес}}^{\text{екс}} = \eta_{\text{тес}}$. У нашому прикладі $\eta_{\text{ео}}^{\text{екс}} = \eta_{\text{тес}}^{\text{екс}} \eta_{\text{леп}}^{\text{екс}} \eta_{\text{оп}}^{\text{екс}} = 0,38 \cdot 0,92 \cdot 0,08 = 0,028$, або 2,8%, тоді як при теплопостачанні від паливної опалювальної котельні - $\eta_{\text{ок}}^{\text{екс}} = 6,5\%$. Тобто за прийнятих умов ОК витрачає палива у 2,3 рази менше (6,5/2,8) у порівнянні з опаленням від КЕС.

Системи теплопостачання від опалювальних котелень (ОК) на органічному паливі і від електронагрівачів, що споживають електроенергію від ТЕС, мають малий ексергетичний ККД ($\eta^{\text{екс}} < \tau_{\text{п}}$). Такі системи неефективно використовують ексергію первинних енергоресурсів внаслідок значних втрат ексергії, пов'язаних із процесом горіння, теплопередачі при великій різниці температур тощо. Втрати ексергії в зазначених системах опалення пов'язані з явищами органічно їм властивими (власні втрати ексергії), вони не можуть бути усунуті або знижені без заміни системи або її частини на інші, призначені для тих же цілей.

Проведений аналіз системи електроопалення стосується лише ефективності використання палива на виробництво корисної продукції. Заключне рішення по практичному впровадженню системи приймається на основі техніко-економічних розрахунків, в яких враховуються не лише витрати палива, а й інші економічні показники (вартість установки, надійність, простота обслуговування та інш.). Отже, хоча система електричного опалення погано використовує первинну енергію, при певних умовах її застосування може бути доцільним [11].

4. Теплонасосна система опалення

Теплові насоси являють собою цікаву альтернативу по відношенню до традиційних систем опалення у зв'язку з можливістю покривати потребу в енергії в опалювальній теплоті з допомогою теплоти навколишнього середовища. Цей спосіб опалення здається досить привабливим (COP системи >1) у порівнянні з традиційними системами (COP <1).

Принципова схема системи опалення з тепловим насосом, компресор якого приводиться в дію електромотором, показана на рис. 7.

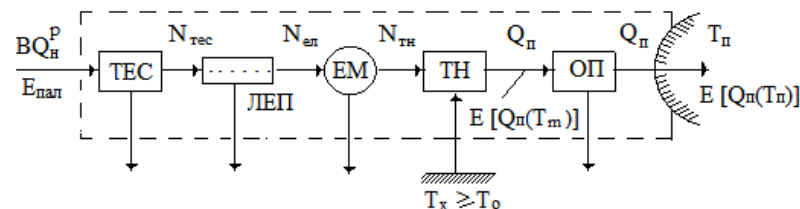


Рисунок 7 - Схема системи опалення з тепловим насосом

В схемі прийнято, що механічні втрати компресора використовуються в самому тепловому насосі, а теплота від електричного мотору відводиться в навколишнє середовище.

Енергетичний аналіз

На основі аналізу енергетичного балансу цієї схеми можна записати вираз для коефіцієнта перетворення енергії (коефіцієнта використання первинної енергії) всієї теплонасосної системи опалення:

$$\eta_{\text{ТНУ}} = \frac{Q_{\text{п}}}{BQ_{\text{н}}^{\text{п}}} = \frac{N_{\text{Тес}}}{BQ_{\text{н}}^{\text{п}}} \cdot \frac{N_{\text{ел}}}{N_{\text{Тес}}} \cdot \frac{N_{\text{ТН}}}{N_{\text{ел}}} \cdot \frac{Q_{\text{п}}}{N_{\text{ТН}}} = \eta_{\text{Тес}} \eta_{\text{Леп}} \eta_{\text{ем}} \eta_{\text{ТН}} \quad (20)$$

де $\eta_{\text{Тес}}$ – енергетична ефективність виробництва електричної енергії на ТЕС (COP); $\eta_{\text{Леп}}$ – ККД ліній електропередачі (ЛЕП); $\eta_{\text{ем}}$ – ККД електромотора; $\eta_{\text{ТН}}$ – коефіцієнт перетворення енергії власне теплового насосу. В енергетичному аналізі при визначенні $\eta_{\text{ТНУ}}$ затраченою прийнято вважати не всю енергію, що підводиться до ТН, а лише ту її частину, яка пов’язана з добуванням і спалюванням палива, тобто ту частину, яка одержується ціною значних затрат. Отже, $\eta_{\text{ТНУ}}$ оцінює ефективність використання енергії природних енергетичних ресурсів (ПЕР) в опалювальній системі. Для середніх значень $\eta_{\text{Тес}} = 0,38$, $\eta_{\text{Леп}} = 0,95$, $\eta_{\text{ем}} = 0,92$ маємо:

$$\eta_{\text{ТНУ}} = 0,874 \eta_{\text{Тес}} \eta_{\text{ТН}} \quad (21)$$

Зв’язок між цими величинами показано на рис. 8.

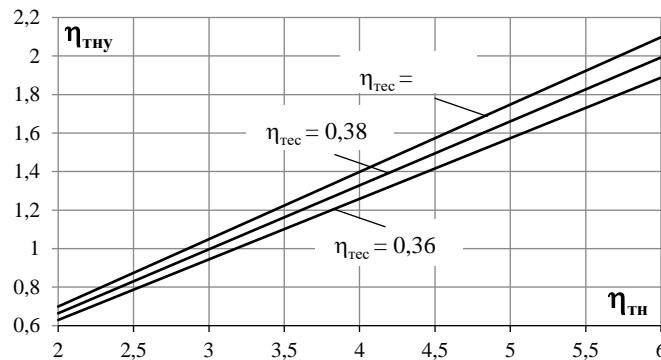


Рисунок 8 – Залежність коефіцієнта перетворення енергії $\eta_{\text{ТНУ}}$ від коефіцієнту перетворення ТН $\eta_{\text{ТН}}$ за різних значень ККД ТЕС.

Для попередньої оцінки коефіцієнта перетворення енергії всієї теплонасосної системи опалення $\eta_{\text{ТНУ}}$ за відомим значенням $\eta_{\text{ТН}}$ на підставі (21) можна скористатися залежністю:

$$\eta_{\text{ТНУ}} = \eta_{\text{ТН}} / 3 \quad (22)$$

Отже, якщо система опалення досягає $\eta_{\text{ТНУ}} > 1$ ($Q_{\text{п}} > BQ_{\text{н}}^{\text{п}}$), то $\eta_{\text{ТН}}$ має бути більше, ніж 3; тобто, лише значний коефіцієнт перетворення $\eta_{\text{ТН}}$ може призвести до прийнятних значень $\eta_{\text{ТНУ}}$. Для того, щоб система з ТНУ була більш вигідною в енергетичному відношенні (економія палива), ніж система з опалювальною котельнею, необхідно мати $\eta_{\text{ТНУ}} > \eta_{\text{ку}}$. При $\eta_{\text{ку}} = 0,85$ коефіцієнт $\eta_{\text{ТН}}$ повинен бути $\eta_{\text{ТН}} > \eta_{\text{ТН min}} = 2,6$. Інакше ТЕС буде споживати більше первинної енергії, ніж котельня.

Економія палива в системі опалення з ТНУ порівняно з котельнею при $\eta_{\text{ТНУ}} > \eta_{\text{ку}}$ визначається як:

$$\frac{\Delta B}{B_{\text{ку}}} = \frac{B_{\text{ку}} - B_{\text{ТНУ}}}{B_{\text{ку}}} = 1 - \frac{1}{\epsilon} \quad (23)$$

де $\epsilon = \frac{B_{\text{ку}}}{B_{\text{ТНУ}}} = \frac{\eta_{\text{ТНУ}}}{\eta_{\text{ку}}}$ – коефіцієнт економії палива [12].

З виразів (4) та (20) слідує:

$$\epsilon = \frac{\eta_{\text{Тес}} \eta_{\text{Леп}} \eta_{\text{ем}} \eta_{\text{ТН}}}{\eta_{\text{кот}} \eta_{\text{ТМ}}} \quad (24)$$

При прийнятих нами значеннях $\eta_{\text{Тес}} = 0,38$; $\eta_{\text{Леп}} = 0,95$; $\eta_{\text{ТМ}} = 0,9$ маємо $\epsilon = 0,37 \frac{\eta_{\text{ТН}}}{\eta_{\text{кот}}}$ і

$\eta_{\text{ТН}} > \eta_{\text{кот}} / \eta_{\text{Тес}}$. Економія палива має місце при $\epsilon > 1$, при цьому виконується нерівність $\eta_{\text{ТНУ}} > \eta_{\text{ку}}$. Залежність $\epsilon = \epsilon(\eta_{\text{ТН}}, \eta_{\text{кот}})$ показана на рис. 9.

Звернемо ще раз увагу, що мова йде лише про економію палива. У дійсності доцільність застосування ТНУ замість опалювальної котельні визначається техніко-економічними розрахунками, в яких враховується, зокрема, вартість ТНУ та ОК, різниця цін на паливо та електричну енергію для них, тощо. При меншій вартості ОК економія первинної енергії в ТНУ повинна бути більш помітною. Наприклад, економія палива $\frac{\Delta B}{B_{\text{кот}}} = 0,4$, або 40% вимагає, щоб коефіцієнт економії палива дорівнював $\epsilon = 1,66$. При цьому за залежністю (21), коли $\eta_{\text{кот}} = 0,85$, то $\eta_{\text{ТН}} = 3,8$, а коефіцієнт перетворення енергії всієї теплонасосної системи опалення дорівнює $\eta_{\text{ТНУ}} = 1,27$.

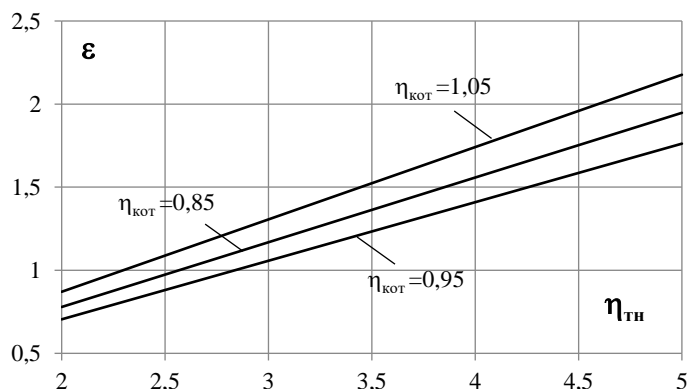


Рисунок 9 - Залежність коефіцієнту економії палива від $\eta_{ТН}$ та $\eta_{кот}$.

Ексергетичний аналіз

Згідно рис. 7, для ексергетичного ККД системи теплонасосного опалення при середній температурі теплоносія T_m можна записати:

$$\eta_{ТНУ}^{екс} = \frac{E[Q_n(T_n)]}{E_{пал}} = \frac{N_{тес}}{E_{пал}} \cdot \frac{N_{ел}}{N_{тес}} \cdot \frac{N_{ТН}}{N_{ел}} \cdot \frac{E[Q_n(T_m)]}{N_{ТН}} \cdot \frac{E[Q_n(T_n)]}{E[Q_n(T_m)]} = \eta_{тес}^{екс} \eta_{леп}^{екс} \eta_{ем}^{екс} \eta_{ТН}^{екс} \eta_{оп}^{екс} \quad (26)$$

Звідси ексергетичний ККД теплового насосу:

$$\eta_{ТН}^{екс} = \frac{E[Q_n(T_m)]}{N_{ТН}} = \frac{Q_n}{N_{ТН}} \tau_m = \eta_{ТН} \cdot \tau_m \quad (27)$$

В цій формулі ексергетичний ККД $\eta_{ТН}^{екс}$ враховує втрати ексергії в циклі (необоротності в дроселі і компресорі та від необоротного теплообміну в випарнику і конденсаторі). Коефіцієнт $\eta_{ТН}^{екс}$ – відносно малозмінна величина для даного класу ТН. Згідно [5] для орієнтовних розрахунків можна прийняти $\eta_{ТН}^{екс} = 0,45$. Крупні сучасні теплові насоси з корисною тепловою потужністю кілька МВт, які обладнані гвинтовими компресорами, досягають значення $\eta_{ТН}^{екс} = 0,6$. З виразу $COP(ТН) \cdot \tau_m$ випливає, що коефіцієнт перетворення енергії теплового насосу $\eta_{ТН} = \eta_{ТН}^{екс} / \tau_m$ залежить від термодинамічної досконалості процесів в ТН ($\eta_{ТН}^{екс}$) і температурного рівня теплоносіїв (T_m, T_o):

$$\eta_{ТН} = \eta_{ТН}^{екс} \frac{T_m}{T_m - T_o} \quad (29)$$

На рис. 10 наведені графіки залежності $\eta_{ТН}$ та $\eta_{ТНУ}$ від температур (T_m, T_o) з урахуванням рівнянь (22) та (29).

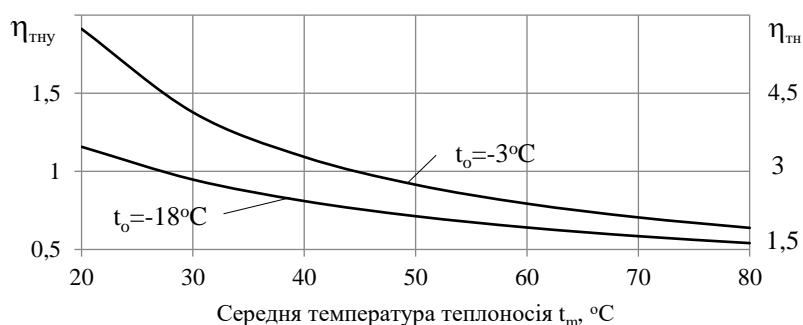


Рисунок 10 - Коефіцієнти перетворення енергії ТНУ і ТН системи опалення у залежності від середньої температури теплоносія T_m за сталого значення ексергетичного ККД ТН $\eta_{ТН}^{екс} = 0,45$.

Як видно з цих даних, зниження температури нагріваємого в ТН теплоносія T_m значно підвищує ефективність роботи ТН і всієї теплонасосної системи опалення. Температура теплоносія $t_m < 40^\circ\text{C}$ характерна для низькоенергетичних опалювальних систем [13,14]. При роботі традиційних опалювальних систем з $t_m > 70^\circ\text{C}$ коефіцієнти перетворення $\eta_{ТНУ}$ в 1,5 – 2 рази нижчі. Оскільки підвищення температури T_m знижує ефективність роботи ТН, то якісне регулювання ($T_m \updownarrow$) не придатне в низькоенергетичних (Low-Ex) опалювальних системах. Регулювання відпускної теплоти шляхом зміни витрати мережної води (кількісне регулювання) буде більш раціональним. Крім електродвигунів для підвищення енергоефективності ТНУ можуть використовуватись і інші приводи, зокрема, двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ). Якщо в якості нижнього джерела теплоти буде використовуватись не атмосферне повітря,

а джерело з більш високою температурою, (наприклад, грант або ґрунтові води, температура яких мало знижується навіть взимку), то ефективність теплового насосу $\eta_{\text{тн}}$ буде більш високою, що приведе до збільшення $\eta_{\text{тну}}$ і коефіцієнта економії палива ϵ .

Висновки

Розрахунки і аналіз результатів роботи дають підстави відмітити наступне. В сучасних опалювальних котлах досягнуто досить високих показників коефіцієнту перетворення енергії (COP) (по старому – енергетичний ККД), до 95%. Проте, низьке значення ексергетичного ККД цих котлів, як і ККД електроопалення, свідчить про те, що такі системи неефективно використовують ексергію первинної енергії внаслідок прояву необоротностей (котли – згоряння палива, передача теплоти від продуктів згоряння до теплоносія; електроопалення – в джерелі електроенергії, при перетворенні електроенергії у теплоту). Вказані необоротності, як і відповідні втрати ексергії органічно властиві цим системам і не можуть бути усунені чи істотно знижені без зміни структури системи або її частин. Не дивлячись на термодинамічну недосконалість, котельні, як і системи електроопалення, внаслідок своєї надійності і низьких неенергетичних витрат широко поширені. Втрати ексергії в теплових насосах залежать, в основному, від недосконалості устаткування – технічні втрати. Ці втрати в принципі можуть бути знижені до нуля без змін структури системи. Реальні системи опалення від теплових насосів більш вигідні за витратою палива у порівнянні з котельними за умови $\eta_{\text{тн}} > \frac{\eta_{\text{кот}}}{\eta_{\text{теп}}}$. Котельня витрачає палива майже в 2,5 рази менше, ніж система з електроопаленням.

Обговорено переваги систем опалення з конденсаційними котлами і низькоенергетичним опалювальним приладдям порівняно з традиційними котельнями.

Список використаної літератури

1. Куделя П.П., Дубовський С.В. Енергетичний та ексергетичний підходи до проблем раціонального використання енергії // Енергетика: економіка, технологія, екологія. – 2021. - №2.-с. 7-16.
2. Kotas T.J. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. Krieger publishing company, Malabar, Florida, 1995 – 328 p.
3. Szargut J. Exergy method: technical and ecological application . Wit press, Southampton, Boston, 2005.- 160 p.
4. Куделя П.П. Методи термодинамічного аналізу установок та систем. [електронний ресурс] : Навчальний посібник/ П.П. Куделя, Г.Б. Варламов. – Київ.-НТУУ «КПІ». Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/453>
5. Baehr H.D. Thermodynamik Grundlagen und technische Anwendungen.-Berlin: Springer, 2005 – 651 S.
6. Эксергетические расчеты технических систем. Справочное пособие. — Под ред. А.А. Долинского и В.М. Бродянского. — Киев : Наукова думка, 1991. — 360 с.
7. Brodyanskiy W.M., Sorin M.V. and Le Goff P. The efficiency of industrial processes. Amsterdam, Elsevier, 1994 – 487 p.
8. Бродянский В.М. Классическая термодинамика на рубеже XXI века: состояние и перспективы развития // Изв. РАН. Энергетика. – № 5. – 2001. – С. 17–43
9. Куделя П.П. Барабаш П.А. Тепловой баланс конденсационных котлов // Енергетика: економіка, технологія, екологія. – 2014. - №1.-с. 51-58.
10. Low exergy systems for high-performance buildings and communities. Annex 49 Summary report ECBCS. – Fraunhofer IBP. – 2011. Режим доступу: www.ecbcs.org. <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/74-85.pdf>
11. Пирков В.В. Электрические кабельные системы отопления. Энергетическое сопоставление.-К.: ООО «Издательский дом Дмитрия Бурого», 2004. – 98 с.
12. Холодильные машины. Справочник. М.: «Легкая и пищевая промышленность».-1982.-222 с.
13. Куделя П.П. Низькоенергетичні опалювальні системи/ П.П. Куделя, А.С. Соломаха. – К.-НТУУ «КПІ».-2015,- 15 с.
14. Szargut J. Low energy heating systems – when can they be profitable. IEA Energy conservation in building and community systems program // Executive committee meeting/ Technical day presentation –Krakow – Nov/ 7-2001.

P. Kudelya⁽¹⁾, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-4941-5795

S. Dubovskiy⁽²⁾, Dr. Eng. Sc., SRF, ORCID 0000-0001-9418-2092

⁽¹⁾National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

⁽²⁾Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine

ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF TYPICAL HEATING SYSTEMS

The main features of energy and exergy methods of analysis the energy transformations efficiency in typical heating systems (boilers, electric heating, heat pumps with electric drive) are presented. The equations of energy and exergy balances of systems and their elements are made. Based on them, expressions for calculating efficiency indicators are obtained. The results of calculations and comparison of energy conversion coefficients (COP - Coefficient of Performance) and exergy efficiencies (Exergy Efficiency or Second Law Efficiency) are presented. It is shown that heating systems based on fuel boilers and electric heaters are characterized by high COP values, which does not focus on taking measures to improve them. At the same time, such systems have rather low values of exergetic efficiency. It is shown that exergy efficiency of a typical electric heating system reaches about 3%, and heating based on fuel boilers - about 6,5 %. The analysis of the main reasons of thermodynamic irreversibility in the specified systems is executed. The diagram of changes exergetic efficiency in consecutive elements of a typical heating system on the example of a fuel boiler room is given. It is shown that in a fuel boiler the main irreversibilities occur at the stages of combustion and heat transfer at a large temperature difference. In electric heating systems, the main exergy losses occur during the production of electricity at thermal power plants and during the conversion of electricity into heat in electric heaters. Possibilities and main ways to reduce the thermodynamic irreversibility of the heating system from the steam boiler house during its conversion into a mini - CHP are considered. The analysis of thermodynamic losses in heat pump heating systems is performed. The conditions under which such systems become more energy efficient than systems based on fuel boilers are defined. The reasons for the wide practical application of boilers and electric heating are revealed, despite their low thermodynamic perfection.

Key words: heating systems, Second Law analysis, boiler room, electric heating, heat pump, exergy efficiency.

References

- 1.Kudelia P.P., Dubovskiy S.V. Enerhetychni ta ekserhetychni pidkhody do problem ratsionalnoho vykorystannia enerhii // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiia, ekolohiia. – 2021. - №2.-s. 7-16.
- 2.Kotas T.J. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. Krieger publishing company, Malabar, Florida, 1995 – 328 p.
- 3.Szargut J. Exergy method: technical and ecological application . Wit press, Southampton, Boston, 2005.- 160 p.
- 4.Kudelia P.P. Metody termodynamichnoho analizu ustanovok ta system. [elektronnyi resurs] : Navchalnyi posibnyk/ P.P. Kudelia, H.B. Barabashov. – Kyiv.-NTUU «KPI». Rezhym dostupu: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/453>
- 5.Baehr H.D. Thermodynamik Grundlagen und technische Anwendungen.-Berlin: Springer, 2005 – 651 S.
- 6.Эксергетические расчеты технических систем. Справочное пособие. — Под ред. А.А. Долынского и В.М. Бродянского. — Киев : Наукова думка, 1991. — 360 с.
- 7.Бродянский В.М., Сорин М.В. and Le Goff P. The efficiency of industrial processes. Amsterdam, Elsevier, 1994 – 487 p.
- 8.Бродянский В.М. Классическая термодинамика на рубеже XXI века: состояние и перспективы развития // Yzv. RAN. Enerhetyka. – № 5. – 2001. – S. 17–43
- 9.Kudelia P.P. Barabash P.A. Teplovoi balans kondensatsyonnykh kotlov // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiia, ekolohiia. – 2014. - №1.-s. 51-58.
- 10.Low exergy systems for high-performance buildings and communities. Annex 49 Summary report ECBCS. – Fraunhofer IBP. – 2011. URL: www.ecbcs.org. <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/74-85.pdf>
- 11.Pyrkov V.V. Электронные кабельные системы отопления. Энергетическое сопоставление.-К.: ООО «Yzdatelskyi dom Dmytryia Buraho», 2004. – 98 s.
- 12.Kholodylnye mashyny. Spravochnyk. M.: «Lehkaia y pyshchevaia promyshlennost».-1982.-222 s.
- 13.Kudelia P.P. Nyzkoenerhetychni opaliuvalni systemy/ P.P. Kudelia, A.S. Solomakha. – K.-NTUU «KPI».-2015,- 15 s.
- 14.Szargut J. Low energy heating systems – when can they be profitable. IEA Energy conservation in building and community systems program // Executive committee meeting/ Technical day presentation –Krakow – Nov/ 7-2001.

Надійшла 26.05.2022

Received 26.05.2022