

## SECTION XVIII. ÉNERGIE ET INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE

DOI 10.36074/logos-08.07.2022.046

### ПОБУДОВА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ СХЕМ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ДИМОВИХ ГАЗІВ РАЙОННИХ КОТЕЛЕНЬ

ORCID ID: 0000-0001-8146-2562

**Сенецький Олександр Володимирович**

доктор техн. наук, старш. наук. співроб.,  
старш. наук. співроб. відділу оптимізації процесів і конструкцій турбомашин  
*Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгірного НАН України*

доцент кафедри альтернативної електроенергетики і електротехніки  
*Харківський національний університет міського господарства  
імені О. М. Бекетова*

ORCID ID: 0000-0002-4281-2790

**Бабак Микола Юрійович**

канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,  
старш. наук. співроб. відділу оптимізації процесів і конструкцій турбомашин  
*Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгірного НАН України*

УКРАЇНА

Питання з підвищення ефективності використання викопних паливних ресурсів та впровадження енергетичного устаткування на відновлювальних паливних ресурсах стає все більш та більш актуальним. На теперішній час у світі набуває все більшого розвитку такий напрям як реалізація замкнених паротурбінних циклів на різних робочих тілах, так званих органічних Ренкіна циклів (ОРЦ) [1–3]. Реалізація таких теплових схем дозволяє використовувати теплоту малого потенціалу (120–300 °C) для виробництва електричної енергії.

Дані Інституту газу НАН України показують, що в Україні налічується >200 котлів потужністю від 30 до 180 Гкал/год. Одиначна електрична потужність ОРЦ контуру при реалізації на міських котельнях становитиме від 100 до 2000 кВт. Котельні нашої Держави здебільшого є типовим. Це дозволить розробити типоряд ОРЦ контурів й знизити вартість встановлення 1 кВт електричної потужності. Завдяки застосуванню ОРЦ контурів на міських і районних котельнях України можна виробляти >50 МВт електричної потужності [4].

Вирішення проблеми утилізації теплоти малого потенціалу при впровадженні ОРЦ технології є багатокритеріальною задачею. З метою спрощення та зменшення часу на пошук раціонального рішення створено та науково обґрунтовано структурований (методологічний) підхід вибору низькокиплячих робочих тіл (НРТ) і теплових схем турбінних циклів, в залежності від потенціалу вихідного джерела теплоти для вироблення електричної енергії [1, 5]. У перспективі це також дозволить підвищити

енергоефективність технологічних процесів підприємств різних галузей економіки України.

Одним з етапів методологічного підходу є визначення витратних і параметричних характеристик основних потоків теплоти спираючись на структурну схему термодинамічного циклу електрогенеруючої установки.

Принципова теплова схема (ПТС) є основою для проєктування, оптимізації та розрахунку номінальних і змінних режимів роботи паротурбінних установок (ПТУ) як у когенераційному, так і у конденсаційному режимах. В загалі ПТС представляє єдиний технічний комплекс різноманітного обладнання з системою технологічних зв'язків.

При створенні та подальшому проєктуванні ПТС розглядається:

- вибір початкових й кінцевих параметрів пари;
- регенеративний (рекуперативний) підігрів робочого тіла;
- вибір когенераційного або конденсаційного термодинамічного циклу.

Проєктними показниками обладнання у більшості випадків є:

- початкові параметри пари та параметри конденсації робочого тіла;
- недогрів у теплообмінниках поверхневого типу;
- втрати тиску робочого тіла є незначними (в зв'язку з малими довжинами трубопроводів);

- ККД складових теплової схеми (устаткування).

З метою підвищення ефективності роботи турбінних циклів на джерелах скидної теплової енергії необхідний комплексний підхід, який включає в себе:

- визначення параметрів на вході та виході турбіни;
- вибір робочого тіла;
- компоновка теплової схеми.

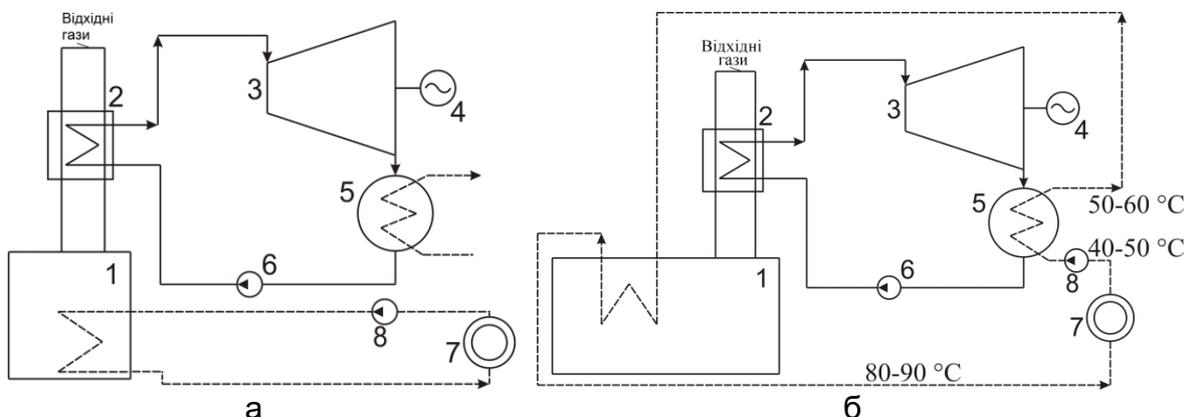


Рис. 1. Принципова теплова схема когенераційної установки з водогрійним котлом та ОРЦ контуром: 1 – водогрійний котел; 2 – випарник НРТ; 3 – турбіна на НРТ; 4 – електрогенератор; 5 – теплообмінник-конденсатор; 6 – конденсатний насос; 7 – споживач теплоти; 8 – насос сітьової води

Максимальний ККД циклу досягається в тому випадку, якщо комплексно підійти до виконання завдання енергозбереження на основі використання скидної теплоти районних котельень з метою вироблення електроенергії. При цьому необхідно враховувати, що теплові схеми на низькокиплячих робочих тілах (НРТ) для утилізації теплоти димових газів реалізуються на існуючих об'єктах, це регламентує наявність вільних площ у приміщеннях. Тому для такого напрямку енергозбереження необхідно підбирати просте та компактне

енергогенеруюче устаткування. Вибір можна зупинити на ПТС наведених на рис. 1. Такий підхід дозволить знижувати температуру димових газів до 70–80 °С з частковою конденсацією парів води й підвищити ККД котла на ~5 % і виробляти електричну енергію на основі реалізації ОРЦ контурів без додаткового спалювання палива, отримувати воду для поповнення витоків та можливість повернення теплоти до циклу при конденсації робочого тіла зворотною сітьовою водою (рис. 1, б).

Розрахунок теплових схем здійснюється з використанням програмного комплексу, розробленого в ІПМаш НАН України [1] та адаптовано для моделювання теплових схем на різних робочих тілах. Розроблена математична модель дає можливість формувати процеси у складових елементах і зв'язках теплової схеми наступними рівняннями:

– балансу енергії відповідного  $k$ -го елемента:

$$\sum_{j=1}^{J_k-K_k} (\eta \cdot G \cdot h)_j + \sum_{j=1}^{K_k} (\eta \cdot E)_n = 0;$$

– балансу витрат відповідного  $l$ -го енергоносія  $k$ -го елемента:

$$\sum_{j=1}^{J_{kl}} G_j = 0;$$

– гідравлічного балансу витрат відповідного  $l$ -го енергоносія  $k$ -го елемента:

$$(p_{\text{вх}} - \Delta p - p_{\text{вих}})_{kl} = 0;$$

– зміни ентальпії відповідного  $l$ -го енергоносія  $k$ -го елемента:

$$(h_{\text{вх}} - \Delta h - h_{\text{вих}})_{kl} = 0,$$

де:

$G$ ,  $h$ ,  $p$  – витрата, ентальпія й тиск енергоносія;  $E$  – потужність енергетичного потоку;  $\eta$  – ККД;  $\Delta h$ ,  $\Delta p$  – зміна ентальпії та тиску енергоносія в елементі або зв'язку;  $J$  – загальне число енергоносіїв в елементах;  $K$  – число енергетичних потоків в елементах; індекси «вх», «вих» – параметри на вході та виході елемента.

Енергоносії в теплоенергетичних установках можуть бути різні (рідина, пара, повітря, гази, тепла, механічна й електрична енергії). При цьому потоки теплоносіїв характеризуються витратою і двома термодинамічними параметрами, а потоки енергії одним параметром – потужністю.

$\eta$ ,  $\Delta h$ ,  $\Delta p$  є залежними від витрати  $G$  й термодинамічних параметрів теплоносіїв  $X$  та конструктивних параметрів елементів установки  $Z$  і для  $k$ -го елемента установки можуть бути описані наступним чином:

$$\eta_k = f(G_k, X_k, Z_k); \quad \Delta p_k = f(G_k, Y_k, X_k); \quad \Delta h_k = f(G_k, Y_k, X_k).$$

Зміна витратних, термодинамічних й конструктивних параметрів у елементах установки може бути лише в межах фізично обґрунтованих і технічно реалізованих станів енергоносіїв та конструкцій:

$$G_k^{\min} \leq G_k \leq G_k^{\max}; \quad Y_k^{\min} \leq Y_k \leq Y_k^{\max}; \quad X_k^{\min} \leq X_k \leq X_k^{\max}.$$

Побудовані ПТС й адаптована математична модель (з врахуванням термодинамічних властивостей робочих тіл) дозволять провести розрахункові дослідження та переходити до наступного етапу (отримання газодинамічних та масогабаритних характеристик основних елементів теплової схеми й подальшої оцінки доцільності реалізації проекту).

**Список використаних джерел:**

- [1] Сенецький О.В. (2020) *Науково-методологічні основи енергозбереження на базі турбоустановок малої потужності при утилізації вторинних енергетичних ресурсів: дис. ... докт. техн. наук: 05.05.16*. Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова.
  - [2] Castelli A.F., Elsidio C., Scaccabarozzi R., Nord L.O. and Martelli E. (2019) Optimization of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery From Aluminum Production Plants. *Frontiers in Energy Research*, 7 (art. 44), 1–19, doi: 10.3389/fenrg.2019.00044.
  - [3] Yu H., Eason J., Gundersen T., Feng X. (1 October 2018) Process integration of organic Rankine cycle (ORC) and heat pump for low temperature waste heat recovery. *Energy*, 160, 330–340, doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.028.
  - [4] Єрмілова С. (ред.) (2016). *Кращі з доступних технологій для житлово-комунального господарства України. Керівництво з відбору технологій*. Київ: Поліграф плюс.
  - [5] Malyarenko V. A., Senetskyi O. V., Kolodyazhny S. V. (May 24-28, 2021) Methodological approach to solving energy saving issue based on the use of secondary energy resources. *CYSENI 2021*. Lithuanian Energy Institute, Kaunas, Lithuania, 468–478.
-