

# ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

УДК 620.31

**С.В. ДУБОВСЬКИЙ**, д-р техн. наук, **О.С. ТВЕРДОХЛІБ**  
Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

## ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ КОМБІНОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА ТЕПЛОТИ ТА ХОЛОДУ

*На основі термодинамічного аналізу запропоновано новий метод визначення витрат приводної енергії на отримання продуктів комбінованого виробництва теплоти і холоду.*

*Ключові слова:* комбіноване виробництво теплової енергії та холоду, система централізованого тепло- та холодопостачання, ексергетичний метод поділу витрат, термодинамічний метод поділу витрат.

Комбіноване виробництво теплової енергії та холоду (КВТХ) є на сьогодні одним з найбільш сучасних технологічних рішень з точки зору підвищення енергетичної ефективності, а також вирішення екологічних проблем. Основна умова масштабного використання КВТХ полягає в наявності значного енергозберігаючого ефекту, що виникає внаслідок використання теплових витрат систем охолодження в системах теплозабезпечення.

Приклади використання КВТХ у технологічних процесах хімічної, нафтохімічної, фармацевтичної, харчової промисловості та аграрного сектору відомі здавна і набувають сьогодні широкого розвитку [1, 2]. Разом з тим останніми роками системам КВТХ притаманне масштабне поширення у сфері адміністративно-господарського сектору, зокрема у системах централізованого тепло- та холодопостачання (СЦТХ) громадських та житлових споруд.

© С.В. ДУБОВСЬКИЙ, О.С. ТВЕРДОХЛІБ, 2014

Перша промислова СЦТХ ділового кварталу міста Осака була впроваджена фірмою SHINRYO CORPORATI у 1970 році [3]. Успішний досвід використання спільно з високою ефективністю роботи системи привели до швидкого поширення технологій КВТХ у промислових центрах Японії, де на сьогоднішній день функціонують більш ніж 80 СЦТХ однічною тепловою потужністю понад 5 МВт, а згодом — і в країнах Південно-Східної Азії, Близького Сходу та Європи [4].

За оцінками Європейської комісії, розвиток систем централізованого виробництва теплоти та холоду дасть можливість вже до 2020 року подвоїти питому вагу систем централізованого теплопостачання та забезпечити до 25% потреб систем кондиціонування житлового та громадського фондів країн Європи [5]. Пояснюється це тим, що СЦТХ доцільно впроваджувати на базі систем централізованого теплопостачання від ТЕЦ та теплонасосних станцій, що дозволить забезпечити рівномірність їх навантаження

протягом року з підвищенням економічності.

Разом з тим необхідно враховувати, що застосування технологій КВТХ не завжди забезпечує достатню конкурентоспроможність порівняно з системами роздільного виробництва теплоти і холоду, і аналіз відповідних проектів має супроводжуватись об'єктивними порівняннями з аналогічними виробництвами як комбінованого, так і роздільного типів за показниками енергетичної ефективності та вартості виробництва.

Такий аналіз може виконуватись на основі інтегральних або диференціальних показників.

**Інтегральний аналіз** ефективності виконується звичайно на основі порівняння витрат приводної або первинної енергії в енергетичних або вартісних одиницях на одержання обох продуктів КВТХ з відповідними витратами можливої системи роздільних виробництв теплоти і холоду. Різниця відповідних витрат визначається як економія первинного палива або коштів внаслідок комбінованого виробництва. Такий підхід до оцінки енергетичної ефективності використовується, зокрема, у [6,7] для аналізу систем тригенерації та [8] для аналізу систем комбінованого каскадного виробництва холоду і теплоти. Поряд із простотою та зрозумілістю, зазначений підхід містить такий очевидний недолік, як пряма залежність від властивостей системи порівняння. Енергетичні і економічні показники цієї системи, у силу її абстрактності, є досить невизначеними, можливий склад – завідомо неповним через неможливість врахування всіх можливих варіантів здійснення. До цього необхідно додати умовність порівняння різних джерел первинної енергії (атомної енергії, гідроенергії, сонячної енергії та ін.), що можуть використовуватися для одержання теплоти і холоду.

Для інтегральних оцінок енергетичної ефективності комбінованого виробництва теплоти і холоду без умовних порівнянь використовують показник загальної енергетичної ефективності (у зарубіжній літературі – ІТЕЕ (index of total energy efficiency)), що визначається за формулою [8,9]:

$$\mu_o = \frac{Q_h + Q_c}{L}, \quad (1)$$

де  $Q_c$ ,  $Q_h$  – кількість виробленого холоду та теп-

лоти відповідно;  $L$  – загальні витрати приводної енергії.

Даний показник забезпечує об'єктивність порівняння систем з однаковими температурами охолодження і нагрівання (наприклад, кімнатних кондиціонерів повітря), однак він втрачає сенс при порівнянні систем різного призначення.

Більш універсальним показником ефективності, принадним до систем різного призначення, що використовуються у різних умовах, є ексергетичний ККД системи, який визначається за співвідношенням [10]:

$$\eta_{ex} = \frac{E_h + E_c}{L}, \quad (2)$$

де  $E_c$ ,  $E_h$  – кількість виробленої ексергії холоду та теплоти відповідно.

**Диференціальний аналіз** ефективності КВТХ передбачає зіставлення різних технологій комбінованого виробництва і роздільного виробництва за показником питомих витрат приводної або первинної енергії на одержання теплоти і холоду окремо. Необхідно зазначити, що ці показники становлять основу енергетичних порівнянь всіх, без винятку, енергетичних технологій і саме вони використовуються для цього у вітчизняній і зарубіжній статистиці.

Складність проведення диференціального аналізу КВТХ зумовлює відсутність просторового розділення потоку приводної енергії між продуктами комбінованого виробництва. Це примушує використовувати на практиці його розрахунковий поділ. Існуючі методи такого поділу не мають загальновизнаного наукового обґрунтування, але є підстави вважати, що основою для його створення є ексергетичний метод термодинамічного аналізу.

Ексергетичний метод поділу витрат в умовах невизначеності внутрішнього устрою КВТХ, передбачає їх розподіл виходячи з того, що ексергетичні ККД процесів виробництва теплоти і холоду однакові і дорівнюють повному ексергетичному ККД, що визначається за формулою (2). Цей принцип у ролі правдоподібного припущення був запропонований Р. Нітчем [11] стосовно процесів комбінованого виробництва електричної енергії і теплоти. З нього випливає поділ витрат приводної енергії комбінованого процесу пропорційно ексергії продуктів, запропонований ним же. У подальших

роботах [10, 12] цей принцип узагальнено на всі процеси комбінованого перетворення.

Згідно з цим, поділ витрат приводної енергії на комбіноване одержання теплоти і холоду визначається за формулами:

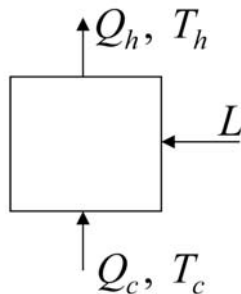
$$L_h = L \frac{E_h}{E_h + E_c} = \frac{E_h}{\eta_{ex}}, \quad (3)$$

$$L_c = L \frac{E_c}{E_h + E_c} = \frac{E_c}{\eta_{ex}}. \quad (4)$$

У гіпотетичному випадку оборотного протікання процесів КВТХ (ідеальна установка) згадане допущення є цілком обґрунтованим, однак при реальному необоротному протіканні процесів допущення про рівність ексергетичних ККД паралельно протікаючих процесів у своїй основі містить елемент довільності і його застосування для аналізу систем та установок може призвести до суперечливих висновків.

Усунення зазначеного недоліку становить основну мету цієї роботи.

Для подальшого аналізу використаємо загальний випадок застосування системи КВТХ, що зображено на рисунку.



Загальна схема установки комбінованого виробництва теплової енергії та холоду

Сутність задачі поділу полягає у тому, що витрати механічної роботи необхідно розділити на частини, які відносяться, відповідно, на виробництво холоду та теплоти згідно з рівнянням:

$$L = L_c + L_h. \quad (5)$$

Рівняння балансу ексергії установки комбінованого виробництва теплоти і холоду у загальному випадку має вигляд

$$L = E_h + E_c + D, \quad (6)$$

де  $L$  – приводна енергія,  $E_h, E_c$  – корисна (вихідна) ексергія теплоти і холоду, відповідно,  $D$  – втрати ексергії.

Корисна ексергія теплоти і холоду визначається за формулами

$$E_h = Q_h \cdot \tau_h, \quad (7)$$

$$E_c = Q_c \cdot \tau_c, \quad (8)$$

де  $\tau_h = 1 - \frac{T_a}{T_h}$ ,  $\tau_c = \frac{T_a}{T_c} - 1$  – відповідні ексергетичні температурні функції,

$T_h$  – температура віддачі теплоти (нагрівання),  $T_c$  – температура вилучення теплоти (охолодження),  $T_a$  – температура оточуючого середовища.

Необоротні втрати ексергії в установці, за теоремою Гюї – Стодоли [12], можуть бути визначені за виразом

$$D = T_a \cdot (s_c + s_h) = T_a \cdot \left( \frac{q_h}{T_h} + \frac{q_c}{T_c} \right), \quad (9)$$

де  $s_c, s_h$  – швидкість напрацювання ентропії у відповідних процесах одержання теплоти і холоду,  $q_c, q_h$  – виділення теплоти на узагальнених (електричних, механічних, гідравлічних і теплових) опорах у відповідних процесах перетворення.

Для повністю оберненого циклу комбінованого виробництва теплоти і холоду ( $D=0$ ) рівняння (6) набуває вигляду

$$L = E_h + E_c. \quad (10)$$

Порівнюючи цей вираз з (5) та приймаючи до уваги фізичну однорідність (взаємоперетворюваність) ексергії теплоти і холоду у обернених процесах, неважко визначити відповідні теоретичні витрати приводної енергії на виробіток теплоти і холоду:

$$L_c^o = E_c, \quad (11)$$

$$L_h^o = E_h. \quad (12)$$

У реальній установці, у силу позитивності втрат ексергії, загальні витрати приводної ексергії завжди більші. Це стосується і часткових витрат ексергії на одержання теплоти і холоду, відповідно.

Будемо вважати, що приріст приводної ексергії, зумовлений неідеальністю процесів перетворення, становить певну величину  $l$ . Він поділяється на дві взаємодоповнюючі частини  $l_c$ ,  $l_h$ , що витрачаються на одержання холоду і теплоти відповідно. Виходячи з цього, витрати приводної ексергії на одержання згаданих продуктів будемо шукати у вигляді:

$$L = L^o + l = (E_c + E_h) + (l_c + l_h), \quad (13)$$

$$L_c = L_c^o + l_c = E_c + l_c, \quad (14)$$

$$L_h = L_h^o + l_h = E_h + l_h. \quad (15)$$

Додаткові, порівняно з ідеальним випадком, значення приводної ексергії витрачаються фізично на подолання узагальнених опорів (гідралічних, механічних, термічних і ін.) і тому еквівалентно перетворюються в установці у теплоту втрат, яка виділяється, відповідно, у процесах одержання теплоти і холоду:

$$q_c = l_c, \quad (16)$$

$$q_h = l_h. \quad (17)$$

Враховуючи це у (6) і (9), можна одержати

$$L = E_h + E_c + T_a \cdot \left( \frac{l_h}{T_h} + \frac{l_c}{T_c} \right). \quad (18)$$

Порівняння цього виразу з (13) приводить до співвідношення:

$$l_c + l_h = T_a \cdot \left( \frac{l_h}{T_h} + \frac{l_c}{T_c} \right). \quad (19)$$

Останній вираз дозволяє визначити зв'язок між додатковими витратами приводної енергії у вигляді

$$\frac{l_c}{l_h} = \frac{\tau_h}{\tau_c}. \quad (20)$$

Розв'язуючи це рівняння разом із (13) послідовно, одержуємо

$$\begin{aligned} l_c &= (L - E_h - E_c) \cdot \frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_h} = \\ &= L \cdot (1 - \eta_e) \frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_h}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} l_h &= (L - E_h - E_c) \cdot \frac{\tau_h}{\tau_c + \tau_h} = \\ &= L \cdot (1 - \eta_e) \frac{\tau_h}{\tau_c + \tau_h}. \end{aligned} \quad (22)$$

Згідно із визначенням ексергетичного ККД (2) втрати ексергії визначають за виразом  $D = L - (E_c - E_h) = L \cdot (1 - \eta_e)$ .

Враховуючи це у (21), (22) можна одержати

$$l_c = D \frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_h}, \quad (23)$$

$$l_h = D \frac{\tau_h}{\tau_c + \tau_h}. \quad (24)$$

З цього випливає, що втрати ексергії у процесах комбінованого виробництва теплоти і холоду необхідно поділяти пропорційно питомій ексергії або ексергетичній температурній функції продуктів, а не ексергії продуктів, як це зумовлюється ексергетичним методом поділу.

Враховуючи (23), (24) у (14) і (15), шукані витрати приводної енергії на одержання теплоти і холоду можна одержати у вигляді

$$L_c = E_c + D \frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_h}, \quad (25)$$

$$L_h = E_h + D \frac{\tau_h}{\tau_c + \tau_h}. \quad (26)$$

#### Приклад практичного використання запропонованої методики

Кількісну оцінку витрат механічної енергії на виробництво теплової енергії і холоду при сталих температурах та змінній температурі навколишнього середовища  $T_a$  з метою порівняння отриманих результатів з розрахунками за ексергетичним методом можна провести для практично важливого випадку комбінованого виробництва теплоти і холоду з використанням поршневих холодильних компресорів на низько киплячому робочому тілі.

На рівні орієнтовних оцінок розрахунків достатньо використати емпіричну формулу для визначення опалювального коефіцієнта, що надано у [13] на основі узагальнень розрахункових методик роботи [14] стосовно холодильних компресорів на низько киплячому робочому тілі:

$$\mu = 0,74 \cdot \frac{T_c}{T_h - T_c} - (0,0032T_c + 0,765 \frac{T_c}{T_h}) + 1. \quad (27)$$

Розрахунок виконано для 1 кВт затраченої механічної привідної енергії. При цьому прийнято:  $T_h = 338 \text{ К}$ ,  $T_c = 273 \text{ К}$ .

Отримані дані зведено в таблицю.

Наведені дані показують, що ексергетичний метод завищує витрати первинної енергії на виробництво теплоти і занижує – на виробництво холоду.

Оцінка кількісних відмінностей результатів розрахунку за ексергетичною та запропонованою методикою поділу витрат у розглянутому прикладі лежить в межах 2–24%.

### Порівняльний аналіз запропонованого (термодинамічного) та ексергетичного методів поділу витрат механічної роботи на комбіноване виробництво теплоти і холоду

Температура навколишнього середовища, °С	Частка приводної енергії на виробництво теплоти, кВт		Частка приводної енергії на виробництво холоду, кВт		Холодильний коефіцієнт		Опалювальний коефіцієнт		Ексергетична ефективність виробництва теплоти		Ексергетична ефективність виробництва холоду	
	Термодинамічний	Ексергетичний	Термодинамічний	Ексергетичний	Термодинамічний	Ексергетичний	Термодинамічний	Ексергетичний	Термодинамічний	Ексергетичний	Термодинамічний	Ексергетичний
5	0,92	0,94	0,08	0,06	2,8	2,8	21,0	27,0	0,50	0,49	0,38	0,49
10	0,85	0,88	0,15	0,12	3,1	3,0	10,5	13,2	0,50	0,48	0,38	0,48
15	0,77	0,81	0,23	0,19	3,4	3,2	7,0	8,7	0,50	0,48	0,38	0,48
20	0,69	0,75	0,31	0,25	3,8	3,5	5,3	6,4	0,50	0,47	0,38	0,47

### ВИСНОВКИ

1. На основі термодинамічного аналізу комбінованого виробництва теплоти і холоду запропоновано новий метод визначення витрат приводної енергії на одержання його продуктів.

2. Встановлено, що втрати ексергії комбінованого виробництва теплоти і холоду поділяються пропорційно питомій ексергії (ексергетичній температурній функції) продуктів.

3. Визначено, що ексергетичний метод завищує витрати первинної енергії на виробництво теплоти і занижує – на виробництво холоду тим більше, чим нижче ексергетичний ККД комбінованого виробництва.

4. Наведено практично важливий приклад поділу витрат на одержання продуктів комбінованого виробництва теплоти і холоду за допомогою поршневої холодильної установки на

низько киплячому робочому тілі. Встановлено, що максимальні відмінності запропонованого методу від ексергетичного оцінюються у 24%.

1. *Bassols J.* Trigeneration in the food industry / J. Bassols, B. Kuckelkorn etc. – Colibri by, Tentstraat 5, 6291 BC Vaals, The Netherlands.

2. *Попель О.С.* Тепловые насосы – эффективный путь энергосбережения / О.С. Попель // Проблемы энергосбережения. – 1999. – № 1. – С. 25–32.

3. *District heating and cooling systems.* SHINRYO CORPORATY. – Режим доступу: <http://www.shinryo-international.com>.

4. *The Role of District Heating and Cooling in Japan* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.jdhc.or.jp/en/what.html>.

5. *District Heating Cooling.* – DHC+

Technology Platform. Colophon. – 2009. – 15 p.

6. *Lozano Miguel A.* Energy cost analysis of simple trigeneration systems under variable operation conditions / Miguel A. Lozano, Luis M. Serra, Monica Carvalho // 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. – 2009. – P. 525–534.

7. *Zhi-Gao Sun.* Energy efficiency and economic feasibility analysis of cogeneration system driven by gas engine // Zhi-Gao Sun // Energy and buildings. – 2008. – № 40. – P. 126–130.

8. *Панкосьянов Д.Н.* Энергетическая эффективность комбинированного теплового насоса / Д.Н. Панкосьянов // С.О.К. – 2012. – № 12. – С. 20–22 [Электронный ресурс]. – Режим доступа к журналу: <http://www.c-o-k.ru/articles/energeticheskaya-effektivnost-kombinirovannogo-teplovogo-nasosa>.

9. *Simultaneous cooling and heating with one unit.* – GEA Heat Exchangers. – 2012. – 4 p.

10. *Эксергетические* расчеты технических систем: Справочное пособие / В.М. Бродянский, Г.П. Верхивкер, Я.Я. Карчев и др. Под ред. А.А. Долинского, В.М. Бродянского. АН СССР. Ин-т технической теплофизики. – Киев: Наукова думка, 1991. – 360 с.

11. *Нитч Р.* Эксергетическое разделение затрат комбинированной выработки тепла и электрической энергии и введение эксергетического тарифа на тепло для отопления / Р. Нитч. Под ред. В. М. Бродянского // Энергия и эксергия. – М.: Мир, 1968. – С. 106–121.

12. *Степанов В.С.* Анализ энергетического совершенства технологических процессов / В.С. Степанов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 274 с.

13. *Братута Э.Г.* Производство холода и теплоты в схемах энергетического взаимодействия холодильных и теплонасосных установок / Э.Г. Братута, В.Г. Шерстюк // Интернет-газета «Холодильщик». – 2009. – № 2 (50).

14. *Проценко И.П.* Коэффициент преобразования пароконденсационных тепловых насосов / И.П. Проценко, В.А. Радченко // Теплоэнергетика. – 1988. – № 8. – С. 51–53.

*Надійшла до редколегії 18.03.2014*

*Рецензент*

*Зав.відділу прогнозування*

*науково-технічного прогресу в*

*енергетиці та ефективності*

*енерготехнологій ІЗЕ НАН України,*

*д-р техн. наук, професор*

*О.А. Шрайбер*