

Національна академія наук України
Міністерство енергетики України
Інститут теплоенергетичних технологій НАН України
Громадська рада при Міністерстві енергетики України
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
НТУ «Дніпровська політехніка»
ТОВ DELTIMA



XX Міжнародна науково-практична конференція

**ТЕПЛОВА ЕНЕРГЕТИКА:
ШЛЯХИ РЕНОВАЦІЇ ТА РОЗВИТКУ**

Київ 2024

**Національна академія наук України
Міністерство енергетики України
Інститут теплоенергетичних технологій НАН України
Громадська рада при Міністерстві енергетики України
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
НТУ «Дніпровська політехніка»
ТОВ DELTIMA**

**ТЕПЛОВА ЕНЕРГЕТИКА:
ШЛЯХИ РЕНОВАЦІЇ ТА РОЗВИТКУ**

XX Міжнародна науково-практична конференція

ЗБІРКА НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Київ 2024

ЗБІРКА НАУКОВИХ ПРАЦЬ
XX Міжнародна науково-практична конференція

**«ТЕПЛОВА ЕНЕРГЕТИКА:
ШЛЯХИ РЕНОВАЦІЇ ТА РОЗВИТКУ»**

2024 р.

Національна академія наук України
Міністерство енергетики України
Інститут теплоенергетичних технологій НАН України
Громадська рада при Міністерстві енергетики України
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
НТУ «Дніпровська політехніка»
ТОВ DELTIMA

Затверджено до друку Вченою радою Інституту
теплоенергетичних технологій НАН України

Рецензенти:

Ю. Ф. Снежкін, академік НАН України, професор,
доктор технічних наук

К. Є. П'яних, доктор технічних наук

УДК 621.78.012-37.091.12:005745

ISBN 978-617-7852-52-9

DOI 10.48126/conf2024

Підписано до друку: 01.10.2024
Формат: 60x84/16. Папір офсетний.
Умов. друк. арк. 15,00.
Друк цифровий. Наклад 60 прим.
Замовлення: 6280
Надруковано: ТОВ «Гнозіс»

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116975>

- Ashish, A., Rajagopal, P., Balasubramaniam, K., Kumar, A., Rao, B., & Jayakumar, T.: Bulk ultrasonic NDE of metallic components at high temperature using magnetostrictive transducers. In AIP Conference Proceedings, 1806(1). (2017) <https://doi.org/10.1063/1.4974604>
- Bohachev, I., Babak, V. & Zaporozhets, A.: Novel small-aperture transducers based on magnetostrictive effect for diagnostic systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 3, 69–78. (2022)
- Grivel E, Berthelot B, Colin G, Legrand P, Ibanez V.: Benefits of Zero-Phase or Linear Phase Filters to Design Multiscale Entropy: Theory and Application. *Entropy*, 26(4):332. (2024). <https://doi.org/10.3390/e26040332>
- Zero Phase Filter (Cascade, DBL) VI., <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-api-ref/page/vi-lib/analysis/3filter-llb/zero-phase-filter-cascade-dbl-vi.html> 2024/01/05.

УДК 536.75:621.1

**ТЕРМОДИНАМІКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ**

Самійленко С. М., к.т.н., доц.; Масліков М. О., к.т.н., доц.;

Івашченко Н. В., к.т.н., доц.

Національний університет харчових технологій

**THERMODYNAMICS OF THE ENERGY EFFICIENCY OF
THERMAL-TECHNOLOGICAL SYSTEMS**

Samiilenko S., PhD, Assoc. Prof.; Maslikov M., PhD, Assoc. Prof.;

Ivashchenko N., PhD, Assoc. Prof.

National University of Food Technologies

One of the main efficiency criteria of modern enterprises is their energy efficiency. However, the traditional definition of energy efficiency, as the ratio of energy costs to the produced product, in many cases does not provide an objective answer to two fundamental questions: what is the cause of inefficiency and what is the energy efficiency potential of the system.

The purpose of this study is to develop scientifically based principles of energy efficiency analysis of thermal-technological systems.

У загальному вигляді енергетичні перетворення сучасного підприємства можна представити у вигляді рис. 1, де енергія палива E_{Π}^{tot} у вигляді теплоти

Q_{tech} та електричної енергії E_{tech}^{el} , які є результатом функціонування енергогенеруючої системи (ЕГС), забезпечує реалізацію енерготехнологічних процесів у енерготехнологічній системі (ЕТС) з метою виробництва продукції у необхідній кількості та заданої якості.

Відповідно до класичних міркувань енергетична ефективність такої системи визначається затратами паливно-енергетичних ресурсів чи споживаної енергії на виробництво одиниці продукції, що можна виразити, наприклад, через питому витрату палива:

$$f_{tech}^{tot} = \frac{\text{Паливо}}{\text{Продукт}} \quad (1)$$

Очевидно, підвищення енергоефективності можливе за рахунок зменшення витрати палива за умови збереження або збільшення існуючої продуктивності.

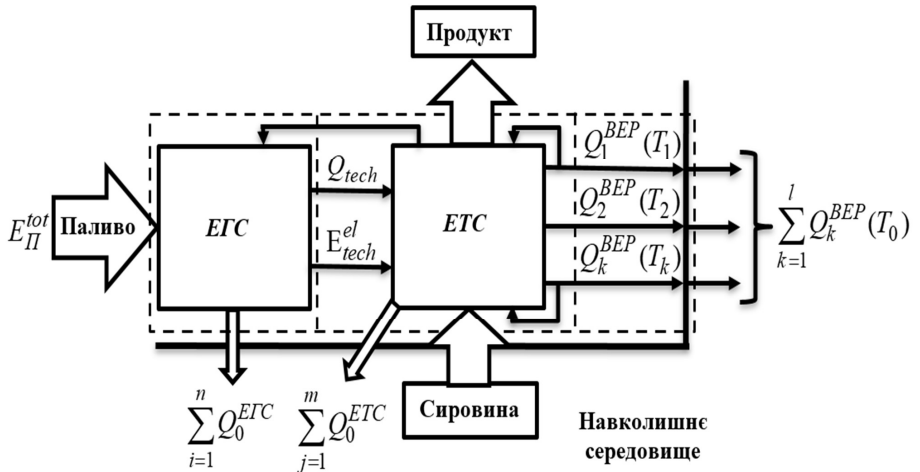


Рис. 1. Узагальнений вигляд енергетичних перетворень у енергогенеруючій та енерготехнологічній системах

Аналіз загальних синтетичних енергетичних балансів систем, що зображені на рис. 1, дозволяє встановити відповідність між енергією палива та іншими енергетичними характеристиками у трьох основних варіаціях:

$$E_{\Pi}^{tot} = Q_{tech} + E_{tech}^{el} + \sum_{i=1}^n Q_0^{EGC}, \quad (2)$$

$$Q_{tech} + E_{tech}^{el} = \sum_{k=1}^l Q_k^{BEP}(T_k) + \sum_{j=1}^m Q_0^{ETC}, \quad (3)$$

$$E_{\Pi}^{tot} = \sum_{i=1}^n Q_0^{EGC} + \sum_{j=1}^m Q_0^{ETC} + \sum_{k=1}^l Q_k^{BEP}(T_0), \quad (4)$$

де Q_{tech} , E_{tech}^{el} – відповідно загальне теплове та електричне навантаження ЕТС; $\sum_{i=1}^n Q_0^{EGC}$ – сумарні тепловтрати в ЕГС; $\sum_{j=1}^m Q_0^{ETC}$ – сумарні тепловтрати

в ЕТС; $\sum_{k=1}^l Q_k^{\text{BEP}}(T_k)$ – сумарна теплота вторинних енергоресурсів (ВЕР), що виходять з ЕТС; $\sum_{k=1}^l Q_k^{\text{BEP}}(T_0)$ – сумарні тепловтрати ВЕР.

Відповідно до рівняння (2) енергетична потреба, що забезпечується спалюванням палива $F_{\text{tec}}^{\text{tot}}$ у ЕГС, головним чином визначається тепловим та електричним навантаженням ЕТС. Це дозволяє розділити загальну витрату палива на теплову та електричну складові й встановити зв'язок з відповідними енергетичними характеристиками:

$$F_{\text{tec}}^{\text{tot}} = F_{\text{tec}}^Q + F_{\text{tec}}^{\text{el}}; \quad (5)$$

$$F_{\text{tec}}^Q = \frac{Q_{\text{tec}}}{Q_{\text{н}}^{\text{p}} \eta_{\text{EGS}}^Q}; \quad (6)$$

$$F_{\text{tec}}^{\text{el}} = \frac{E_{\text{tec}}^{\text{el}}}{Q_{\text{н}}^{\text{p}} \eta_{\text{EGS}}^{\text{el}}}, \quad (7)$$

де η_{EGS}^Q та $\eta_{\text{EGS}}^{\text{el}}$ – ККД ЕГС на вироблену теплоту й електричну енергію відповідно.

Аналіз рівнянь (5) – (7) свідчить, що зменшення загальної витрати палива передбачає зменшення енергоспоживання на технологічні потреби та підвищення ефективності генерації. Зокрема, рівняння (3) показує, що технологічне теплове та електричне навантаження головним чином залежить від ефективності використання ВЕР, тобто від сумарної теплоти невикористаних низькопотенціальних потоків $\sum_{k=1}^l Q_k^{\text{BEP}}(T_k)$. Важливий висновок також дозволяє зробити рівняння (4), яке демонструє, що вся енергія палива через послідовність енергетичних перетворень на заключному етапі передається навколишньому середовищу (НС) і втрачається для технологічного використання. Причиною цього негативного явища є як безпосередня теплова взаємодія високопотенціальних потоків теплоти з НС через недостатньо ефективну ізоляцію чи технологічний процес, так і скидання теплоти низькопотенціальних ВЕР у НС, яку за даних теплотехнологічних умов використати неможливо або недоцільно.

Результати **енергетичного аналізу** ЕГС підприємств цукрової промисловості показують, що лише близько 10% від загальної кількості палива витрачаються на компенсацію тепловтрат [1].

На перший погляд, особливих проблем у даній системі немає. Проте, під час генерації теплової та електричної енергій у системі відбуваються незворотні зміни, що пов'язані не лише із кількісними перетвореннями, але також і з якісними: відбувається генерація **низькопотенціальної ентропійновмісної теплоти**, яка відносно високоорганізованої хімічної енергії палива має меншу

технічну цінність [2–3]. На етапі енергетичного аналізу ЕГС ця проблема майже себе не проявляє, але негативно впливає на енергетичну ефективність ТТС, призводячи до додаткових тепловтрат на завершальному етапі енергетичних перетворень.

Фундаментальний аналіз цієї проблеми потребує залучення потенціалу другого закону термодинаміки. Для цього розглянемо теплову взаємодію гіпотетичної системи (рис. 2) з навколишнім середовищем (стан «0») за допомогою теплових машин (ТМ) (підсистеми «А» та «С»).

На рис. 2 показано два варіанти такої взаємодії: оборотній (*rev*) за допомогою ідеальної ТМ «А» та необоротній (*irrev*) за допомогою реальної ТМ «С». Важливо, що теплова взаємодія в обох випадках відбувається у межах однакових станів, що відповідає абсолютно однаковій зміні термодинамічних параметрів та функції стану. Саме ця подібність найчастіше і приховує необоротність процесів під час класичного енергетичного аналізу, однак енергетичні характеристики цих процесів будуть відрізнятися.

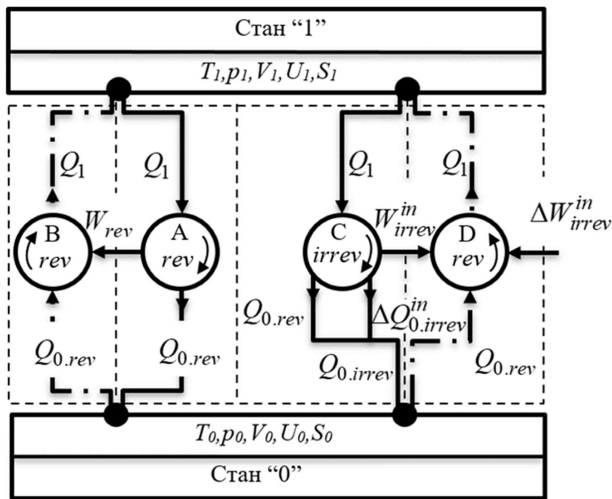


Рис .2. Оборотна і необоротна теплові взаємодії системи з навколишнім середовищем за допомогою теплових машин

Результатом функціонування системи «А» є генерація корисного «енергетичного продукту» у вигляді оборотної (максимальної) роботи W_{rev} і мінімальної (оборотної) теплоти $Q_{0,rev}$, що передається НС. Оборотність такої взаємодії підтверджується функціонуванням ідеальної системи «В», яка, використовуючи W_{rev} , може самостійно повернутися до початкового стану так, що за результатами обох процесів у НС не відбудеться жодних змін, тобто

зворотній процес повністю компенсує прямий. У цьому сенсі $Q_{0.rev}$ відіграє роль функціональних затрат, а не втрати теплоти, як може здатися на перший погляд.

Якщо в системі відбуваються внутрішньо необоротні процеси, як, наприклад, у «С», то така система здатна генерувати менший «енергетичний продукт» W_{irrev}^{in} , але при цьому додатково віддає НС теплоту $\Delta Q_{0.irrev}^{in}$. Очевидно, $\Delta Q_{0.irrev}^{in}$ є наслідком реалізації необоротних процесів і за даних умов виправдано може вважатися втратою теплоти.

Для повернення до початкового стану за допомогою системи «D», у якій, як і в «B», відбуваються внутрішньо оборотні процеси, W_{irrev}^{in} уже недостатньо, а тому компенсація відбувається за рахунок зовнішньої енергії у кількості

$$\Delta W_{irrev}^{in} = W_{rev} - W_{irrev}^{in} \quad (8)$$

або

$$\Delta W_{irrev}^{in} = \Delta Q_{0.irrev}^{in} = Q_{0.irrev} - Q_{0.rev}. \quad (9)$$

Використовуючи формулу Гюї-Стодоли, рівняння (9) можна записати через числовий еквівалент необоротності:

$$\Delta W_{irrev}^{in} = \Delta Q_{0.irrev}^{in} = T_0 \Delta S_{irrev}^{in}, \quad (10)$$

На відміну від класичної термодинаміки, де рівняння (10) використовують для визначення втрат роботоздатності системи, ми пропонуємо добуток термодинамічної температури НС T_0 на збільшення ентропії від необоротності процесів ΔS_{irrev}^{in} вважати енергетичною компенсацією необоротності процесів, що дозволяє зробити наступний важливий висновок: *будь-яка необоротність потребує енергетичної компенсації і призводить до додаткових втрат теплоти*. Цей висновок ми називаємо «принцип енергетичної компенсації необоротності».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Vasilenko, S., Samiilenko, S., Bondar, V., Bilyk, O., Mokretskyu, V., Przybylski, W. (2020). Thermodynamic analysis of the thermal-technological complex of sugar production: the energy and entropy characteristics of an enterprise. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (8 (105)), 24–31. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205148>
2. Kumar, Pasupuleti & Kumar, Naradasu. (2024). Comparative Exergy Analysis of Thermal Power Plant Systems. 10.5772/intechopen.1004696. doi: 10.5772/intechopen.1004696
3. Kaushik, S. C., Reddy, V. S., Tyagi, S. K. (2011). Energy and exergy analyses of thermal power plants: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 (4), 1857–1872. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.007>