

УДК 621.311.22.001.24

Худенко А. А., *д-р техн. наук, проф.*,  
Київський національний університет  
будівництва і архітектури

## ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ТЕПЛОПОСТАЧАННІ

В даний час зниження споживання і економію ПЕР прийнято характеризувати терміном “енергозбереження”.

Якщо підходити до цього поняття з термодинамічних позицій, то такий процес нездійснений в принципі, тому що він суперечить першому закону термодинаміки (закону збереження енергії), який говорить, що енергія не може зникати чи виникати з нічого, вона може лише переходити з одного виду в інший. У застосуванні до замкнених систем цей закон формулюється так: “енергія замкнутої системи постійна і не залежить від змін, що відбуваються в системі”. А. Ейнштейн розширив тлумачення закону збереження енергії, включивши в це поняття масу тіл: усяка зміна енергії тіла  $E$  пов’язана зі зміною його маси  $m$ , тобто  $E = m \cdot c^2$ , де  $c$  – швидкість світла у вакуумі. З цього закону випливає: якщо в результаті якого-небудь процесу маса всіх тіл зменшується на  $1\text{г}$ , то при цьому виділяється енергія, еквівалентна 3000 т. умовного палива. Але такий процес одержання енергії залишається поки чистою теорією і невідомо коли він набуде практичного застосування [2].

Отже, енергозбереженням у повному розумінні цього слова займається сама природа в рамках першого закону термодинаміки.

Термодинамічна недосконалість формулювання не знижує, звичайно, гостру актуальність проблеми енергозбереження у реальних умовах і, зокрема, в галузі теплопостачання.

В даний час при виробленні, транспортуванні, споживанні енергії, а також у заходах з енергозбереження використовується енергетичний метод оцінки ефективності процесів, який оперує винятково кількісними характеристиками перетворення енергії. Енергетична ефективність про-

цесів перетворення енергії, при цьому, характеризується енергетичним ККД, що являє собою відношення кількості корисно використаної енергії  $E_{\text{кор}}$  до повної кількості підведеної енергії,  $E_{\text{під}}$  тобто  $\eta = E_{\text{кор}}/E_{\text{під}}$ . Поняття енергетичного ККД поширюється на усі види енергії, у тому числі і на теплоту. Якість енергії або її працездатність (ексергія) при кількісному підході не враховується зовсім, хоча при її перетворенні мають місце втрати як кількості, так і якості енергії [1]. В даному випадку аналізується тільки термодинамічна якість і не беруться до уваги технологічні якості енергії, різні види якої мають свої технічні показники якості. Технологічна якість електроенергії, наприклад, характеризується такими нормалізованими технічними показниками, як відхилення та коливання частоти, відхилення, коливання, несиметрія, неурівноваженість і несинусоїдальність напруги [2]. Технологічна якість теплової енергії яка використовується для теплопостачання будівель, повинна давати можливість споживачу отримати послугу високої заданої якості, тобто постійну температуру повітря в приміщенні взимку та постійну подачу води на побутові потреби.

Не всяка енергія однаково працездатна. Одержання потрібної споживачу енергії зв'язано, як правило, з низкою процесів взаємних перетворень різних видів енергії. При виробленні електроенергії на теплової електростанції, наприклад, хімічна енергія палива, трансформується в тепло, що переходить у внутрішню енергію пари, яка потім перетворюється в механічну енергію, а остання – в електричну. У будь-яких процесах перетворення тільки механічна і електрична енергії повністю взаємоперетворювані і можуть цілком переходити в інші види енергії, тобто ці види енергії мають стовідсоткову працездатність. Інші види енергії, і в першу чергу теплова, такою працездатністю не відрізняються: теплову енергію не можна перетворити повністю в електричну.

Загальним критерієм якості для усіх видів енергії є ступінь їхньої перетворюваності в заданих умовах у потрібний вид енергії, тобто працездатність. Ця величина вимірюється максимальною кількістю механічної чи електричної енергії, в які можна перетворити даний вид енергії. Так, одна кілокалорія теплоти, що віддається водою при температурі 95 °С менш працездатна і нижча за якість, ніж кілокалорія при температурі 150 °С і тим більше при температурі 1000 °С.

Однак, для визначення працездатності теплової енергії одного температурного потенціалу її недостатньо. У кожному випадку потрібно врахувати також параметри навколишнього середовища, у якому використовується енергія. Якщо температура навколишнього середовища припус-

тимо  $+5\text{ }^\circ\text{C}$ , то ієрархія цінностей однієї кілокалорії теплоти, приведена вище, зберігається. Але якщо припустити, що температура навколишнього середовища буде  $500\text{ }^\circ\text{C}$ , то цінність однієї кілокалорії при  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  значно знизиться, а теплота при  $95\text{ }^\circ\text{C}$  і  $150\text{ }^\circ\text{C}$  не тільки не втратить своєї цінності, але стане ще роботоспроможнішою, але вже не як теплота, а як холод.

Отже, працездатність енергії чи енергоносіїв є мірою їхньої якості, і визначається як станом їх самих (для теплоти – температурою), так і станом навколишнього середовища (для теплоти – температурою) [1].

Ексергія одиниці теплоти  $Q$  визначається залежністю  $E = Q(T_1 - T_2) / T_1$ , де  $T_1$  – температура джерела теплоти, К;  $T_2$  – температура навколишнього середовища, К. Так, ексергія  $1\text{ кВт} \cdot \text{год}$  теплоти від продуктів згоряння з температурою  $T_1 = (1000 + 273)\text{ К}$ , які відводяться в навколишнє середовище з температурою  $T_2 = (20 + 273)\text{ К}$  буде  $E = 1(1273 - 293) / 1273 = 0,77\text{ кВт} \cdot \text{год}$ .

Чим більше відрізняються параметри енергії (енергоносія) і навколишнього середовища, тим ексергія процесу перетворення енергії більша і навпаки. Якщо такої різниці немає, то ексергія дорівнює нулю і одержати корисний ефект від будь-якої кількості енергії неможливо.

Ексергетична ефективність процесів перетворення енергії визначається ексергетичним ККД, який представляє собою відношення корисно спожитої ексергії  $E_{\text{кор}}$  до витраченої  $E_0$ , тобто  $\eta_e = E_{\text{кор}} / E_0$  [1].

Термодинамічна оцінка ефективності процесів перетворення енергії за допомогою ексергетичного ККД може бути розповсюджена також на процеси виробництва продукції, робіт, послуг і таке інше.

При реалізації технологічних схем використання ПЕР мають місце втрати як кількості енергоресурсів, так і якості енергії.

З урахуванням вищезазначеного можна уточнити термін “енергозбереження”. Під енергозбереженням слід розуміти комплекс енергоощадних заходів, направлених на зниження витрати ПЕР з одночасним підвищенням ефективності використання роботоспроможності енергії у процесах її перетворення.

Розглянемо, з урахуванням кількісного і якісного підходів, ефективність процесів виробництва теплоти для теплопостачання опалювальною котельнею.

На рис. 1а приведена схема температурної ситуації при виробленні теплоти котельнею для опалення:  $T_1 \approx 1000\text{ }^\circ\text{C}$  – температура продуктів згоряння в котлі;  $T_2 = 95\text{ }^\circ\text{C}$  – температура теплоносія в системі опалення;  $T_0 = +5\text{ }^\circ\text{C}$  – температура навколишнього середовища;  $Q_1$  – кількість теплоти, спрямована в систему теплопостачання.

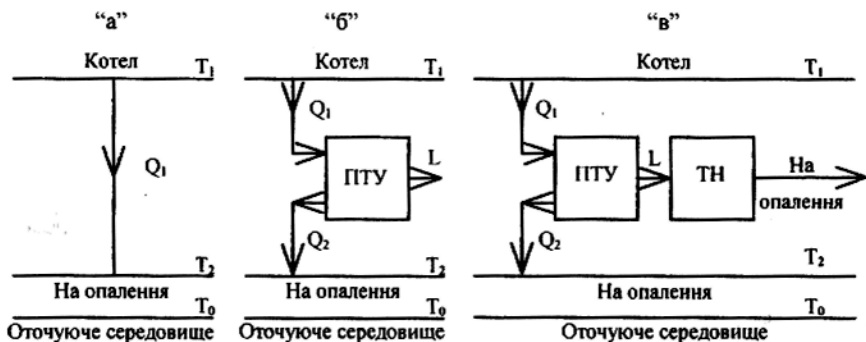


Рис 1. Схеми виробництва теплової енергії для опалення котельнею:  
 “а” – котельня виробляє тільки теплоносії з температурою  $t_2 = 95^\circ\text{C}$ ; “б” – в схему котельні включена паротурбінна установка (ПТУ) і котельня працює за когенераційною технологією: виробляє теплоносії з температурою  $t_2 = 95^\circ\text{C}$  і електричну енергію для опалення; “в” – в схему котельні включені ПТУ і тепловий насос (ТН) і котельня працює за когенераційно-теплонасосною технологією: виробляє теплоносії з температурою  $t_2 = 95^\circ\text{C}$  і електричну енергію для опалення і для ТН, який виробляє теплоносії з температурою  $t = 60^\circ\text{C}$  для водяного опалення.

Кількісна оцінка енергетичної ефективності процесу вироблення теплової енергії, полягає у визначенні енергетичного (теплового) ККД котла. Припустимо, що в результаті застосування різних технічних заходів ККД котла складає 98%, тобто практично максимум можливого. ККД котельні буде при цьому меншим, але в даному випадку нас цікавить котел. При такому значенні ККД втрати первинного палива, припустимо газу, складають всього 2% і процес вироблення теплоти з кількісної точки зору можна вважати максимально енергоекономічним.

З урахуванням якісних перетворень енергії ефективність розглянутого процесу буде зовсім іншою. Ексергетичну оцінку процесу проведемо на 1000 Дж енергії, що надходить у котел з паливом (природним газом).

Ексергія продуктів згоряння в котлі з температурою  $T_1 = 1273\text{ K}$  при температурі навколишнього середовища  $T_0 = 278\text{ K}$  складе:

$$E_{\text{пз}} = q(1 - T_0/T_1) = 1000(1 - 278/1273) = 780\text{ Дж.}$$

Ексергія теплоносія для опалення з температурою  $T_2 = 368\text{ K}$  складе:

$$E_{\text{т}} = q(1 - T_0/T_2) = 1000(1 - 278/368) = 250\text{ Дж.}$$

Внутрішні втрати ексергії в котлі складають:

$$E_{\text{в.вн.}} = E_{\text{пз}} - E_{\text{т}} = 780 - 250 = 530\text{ Дж.}$$

Ексергетичний ККД котла буде дорівнювати:

$$\eta_c = 1 - (E_{п.вн} / E_{пс}) = 1 - (530 / 780) = 32 \%$$

У реальних умовах значення  $\eta_c$  складає 20–25% [2].

Розрахунок показав, що внутрішні втрати ексергії в котлі дуже великі і це пояснюється тим, що частина ексергії втрачається в самому процесі горіння і великі втрати виникають при передачі тепла від продуктів згоряння до теплоносія, температура якого значно нижча. При цьому, ми безцільно втрачаємо працездатність енергоносія і тим самим значно перевитрачаємо первинне паливо. З точки зору енергозбереження процес виробництва теплоти котельнею для опалення є дуже енергомарнотратним у зв'язку з тим, що охолодження продуктів згоряння від  $T_1$  до  $T_2$  відбулося даремно.

Розглянемо тепер схему виробництва теплоти, подану на рис. 1 "б", коли в процес виробництва теплоти котельні включена паротурбінна установка (ПТУ), що використовує працездатність теплової енергії для виробництва електроенергії. При цьому, за рахунок працездатності продуктів згоряння, виробляється електроенергія, а теплота після ПТУ направляється в систему опалення. Перетворення енергії первинного енергоносія з використанням даної схеми здійснюється на ТЕЦ. З включенням у схему котельні ПТУ, котельня буде працювати за когенераційною технологією, тобто в режимі міні ТЕЦ. При цьому ексергія в кількості 530 Дж на 1000 Дж енергії, що мала місце в котлі, що працює в чисто опалювальному режимі за схемою рис. 1 "а" і втрачалася, використовується в схемі рис. 1 "б" для виробництва електроенергії. В реальних умовах ексергетичний ККД такої котельні складає приблизно 37–40% [3] і теплопостачання від котельні, що працює за когенераційною схемою є термодинамічно значно більш вигідним процесом, ніж теплопостачання від котелень, що безпосередньо спалюють органічне паливо для виробництва теплоносія.

Переобладнання опалювальних котелень на виробництво теплоти і електроенергії, може бути здійснено також шляхом включення в схему котельні газотурбінної установки (ГТУ) або газоноршневої установки (ГНУ).

На рис. 1 "в" наведена схема опалювальної котельні, що працює за когенераційною технологією з включенням у виробничий цикл котельні теплового насоса (ТН). Така котельня виробляє теплоносії для опалення і електроенергію для теплового насоса. На сьогоднішній день в світовій практиці це найбільш енергоефективний, з термодинамічної точки зору, спосіб теплопостачання, що дозволяє мінімізувати як витра-

ти первинного палива шляхом підвищення ККД котла, так і у найбільшій мірі використовувати працездатність теплової енергії шляхом виробництва додаткової електроенергії і використання її в теплових насосах. У порівнянні з чисто опалювальною котельнею витрати палива при цьому знижуються у 5–7 разів.

Переобладнання опалювальних котелень на когенераційно-теплонасосну технологію повинно стати головним напрямом у державних планах енергозбереження в галузі тепlopостачання комунально-побутового сектора країни на найближчі 5–10 років.

### **Висновки**

При плануванні і здійсненні заходів з енергозбереження в галузі тепlopостачання об'єктів необхідно проводити кількісний (енергетичний) і якісний (ексергетичний) аналізи процесів перетворення енергії, передбачаючи як мінімізацію витрати ПЕР шляхом підвищення ККД джерел, систем і процесів, так і максимально можливе використання працездатності (ексергії) теплової енергії зокрема шляхом переобладнання котелень на когенераційно-теплонасосні технології.

### **Література**

1. *Бродянский В. М.*, Эксергетический метод термодинамического анализа. – М.: Энергия, 1973. – 224 с.;
2. *Стырикович М. А., Штильрайн Э. Э.* Энергетика – проблемы и перспективы. – М.: “Энергия”, 1981. – 181 с.;
3. Эффективное использование электроэнергии / Пер. с англ.; под ред. Д. Б. Вольфберга. – М.: Энергоиздат, 1981. – 400 с.