

УДК 664.002.5

С.М. Самійленко**С.М. Василенко**, *д-р техн. наук***О.Ф. Буляндра**, *д-р техн. наук***К.О. Штангеев**, *канд. техн. наук***В.В. Шутюк**, *канд. техн. наук*,*Національний університет**харчових технологій***МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ
ТЕРМОДИНАМІЧНОГО
АНАЛІЗУ ТЕПЛООБМІННИХ
СИСТЕМ ЦУКРОВОГО
ВИРОБНИЦТВА. Частина 1**

У статті узагальнено та розвинуто результати сучасних наукових досліджень із термодинамічного аналізу теплообмінних процесів і систем.

Ключові слова: термодинаміка, теплообмін, процес, ентропія, ексергія теплоти.

Успішна реалізація будь-якого завдання з економії паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) на підприємствах цукрової промисловості можлива за умови забезпечення ефективного використання всіх видів енергії на відповідних етапах технологічного процесу. Тому під час аналізу та синтезу теплотехнологічного комплексу (ТТК) цукрового виробництва виникає принципова потреба у визначенні не лише сукупності *робочих характеристик функціонування* комплексу, а й у встановленні *критеріїв*, які б дали можливість аналізувати його енергетичну ефективність і вказували б способи удосконалення. Очевидно, такі критерії повинні бути науково обґрунтованими та відповідати фундаментальним принципам загальної методології оптимізації теплообмінних процесів і систем.

Враховуючи те, що всі природні процеси дещо недосконалі, або, висловлюючись мовою термодинаміки, «необоротні», будь-яка реальна енергетична система потребує більше енергії, ніж це було б можливо в так званих «оборотних» процесах за відсутності недосконалостей. Отже у силу необоротності всіх природних процесів неможливо безпосередньо з експериментальних даних визначити досконалість об'єкта аналізу. На деякій раціональній основі цієї мети можна досягнути, лише розглядаючи цукровий завод як складну *термодинамічну систему* та застосовуючи методи термодинамічного аналізу.

Такі методи дослідження мають свої специфічні властивості та базуються на використанні першого і другого законів термодинаміки. Відповідно розрізняють *метод енергетичних балансів, ентропійний та ексергетичний методи*.

Аналіз сучасного стану досліджень показав, що для визначення ефективності ТТК чи окремих його складових зазвичай застосовують традиційний метод енергетичних балансів та як виняток — ексергетичний метод [6].

Термодинамічний аналіз спрямований на *оцінювання термодинамічної ефективності системи та пошук вузлів недосконалості*, що дає змогу ґрунтовно проаналізувати реальний стан використання енергоресурсів на підприємстві, визначити пріоритетні напрямки і максимальні межі оптимізації як окремих підсистем, так і загальної системи в цілому.

Так, на практиці під час проектування, реконструкції чи визначення оптимальних технологічних режимів функціонування теплообмінної системи (ТС) аналіз зазвичай передбачає оцінювання альтернативних варіантів системи (вибір оптимальної структури технологічних зв'язків між елементами, вибір параметрів ТС). З математичної точки зору така задача зводиться до розв'язання системи нелінійних рівнянь на базі відповідних численних методів і має такий вигляд [10]:

$$\bar{T}_{out} = f(\bar{T}_{in}, \bar{K}, \bar{D}, G); \quad (1)$$

$$\varphi = \varphi(\bar{T}_{in}, \bar{T}_{out}, \bar{K}, \bar{D}, G), \quad (2)$$

де \bar{T}_{out} — вектор температур вихідних технологічних потоків для сукупності теплообмінних апаратів (ТА), що входять у ТС; j — критерій ефективності ТС; \bar{T}_{in} — вектор заданих температур вхідних потоків; \bar{K} — вектор заданих конструкційних параметрів ТА; \bar{D} — вектор заданих або розрахункових технологічних параметрів ТА; G — задана структура технологічних зв'язків (технологічна топологія) ТС.

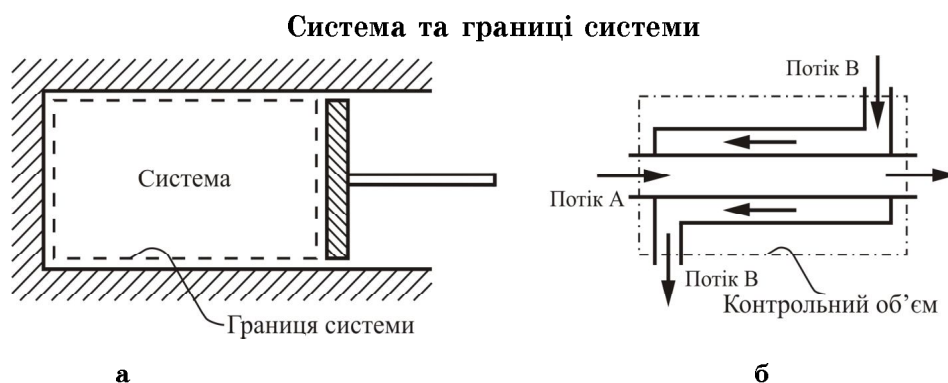


Рис. 1. Приклад термодинамічної системи:
а — закритої; б — відкритої.

Першим спільним етапом для кожного з методів термодинамічного аналізу є виділення термодинамічної системи (надалі — система), яку вибирають так щоб можна було її визначити однозначно її. Усе, що перебуває поза системою, називають зовнішнім середовищем, яке за потреби теж може розглядатися як окрема система. При цьому розрізняють *закри́ту* систему — границі, непроникні для речовини (рис. 1, а); *відкрити́* чи *контрольний об'єм* (рис. 1, б) — границі системи проникні для речовини та *ізолювану* — границі не тільки непроникні для речовини, але й перешкоджають енергообміну між системою і її зовнішнім середовищем. Важливою властивістю границь системи є те, що *ізолюваною також може бути певна система, що взаємодіє із зовнішнім середовищем, якщо вона разом із цим середовищем об'єднується в розширену ізолювану систему* [2].

Метод енергетичних балансів

В основу методу енергетичних балансів покладено перший закон термодинаміки. Враховуючи знаки, його математичний вираз для відкритої системи зі стаціонарними потоками (найпоширеніші в цукровому виробництві) має вигляд:

$$\dot{Q} - N = \sum_{out} \dot{m}_i \left(h_i + \frac{\omega_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum_{in} \dot{m}_j \left(h_j + \frac{\omega_j^2}{2} + gz_j \right). \quad (3)$$

Загалом рівняння (3) пов'язує зміну запасу енергії системи (кінетичної, потенціальної та внутрішньої енергій) з енергією, яка переходить границі системи у формі *роботи* та *теплоти* під час здійснення процесу.

Як відомо, першим суттєвим недоліком методу енергетичних балансів є лише кількісна оцінка енергетичних перетворень, зумовлена рівністю різних форм енергії. Другим недоліком є використання поняття енергетичного ККД:

$$\eta = \frac{\text{Використана енергія}}{\text{Витрата енергії}} = 1 - \frac{\text{Безкорисні затрати енергії}}{\text{Витрата енергії}}. \quad (4)$$

Детальний аналіз фізичного змісту рівняння (4) показує: поняття ККД, очевидно, історично запозичене з механіки, де воно в класичній формі визначається як відношення використаних ресурсів установки або процесу до затрачених. Таке трактування ККД цілком виправдане щодо механічних систем, функціонування яких не пов'язане з перетворенням енергії різних форм або зміною їх потенціалу. Проте в термодинаміці його зміст має чисто антропоморфний характер, впливаючи з аналізу призначення теплоенергетичних систем перетворювати первинні енергоресурси в інші види енергії з мінімальною втратою цих ресурсів.

Пояснимо це на прикладі теплообмінника. Так, з урахуванням рівняння (4) енергетичний ККД теплообмінника має такий вигляд:

$$\eta = \frac{Q_F}{Q} = \frac{Q_F}{Q_F + Q_{nc}}, \quad (5)$$

де Q_F — тепловий потік, що передається через поверхню теплообміну від гарячого до холодного теплоносія; Q — загальний тепловий потік, що надходить із гарячим теплоносієм; Q_{nc} — тепловий потік, що надходить до навколишнього середовища.

З аналізу рівняння (5) можна зробити висновок, що для теплообмінника, як і будь-якої іншої ТС, енергетичний ККД є характеристикою лише ефективності ізоляції. Для аналізу теплообмінників використовують і більш інформативні критерії: коефіцієнт ефективності теплообмінників E [4], енергетичний коефіцієнт Кірпичова E_0 [7], але жоден із них не характеризує ефективність об'єкта в цілому, розглядаючи лише окремі сторони технологічного процесу. Більше того, застосування критеріїв на основі будь-яких комбінацій складових першого закону термодинаміки в силу наведених причин на сьогодні недостатнє. Тобто під час аналізу ефективності систем, у тому числі й теплообмінних, метод енергетичних балансів у першу чергу доцільно застосовувати для складання енергетичної моделі функціонування об'єкта аналізу.

Другий закон термодинаміки. Ентропія. Ексергія

Для обґрунтування об'єктивної методики аналізу термодинамічної ефективності ТС насамперед з'ясуємо величини, які дають можливість в одній площині кількісно порівнювати якісно нерівноцінні енергоресурси — потоки механічної енергії та потоки теплоти різного потенціалу.

З технічної точки зору цінність будь-якої енергії в системі визначається не тільки кількістю (описує перший закон термодинаміки), а й тим, як вона може бути використана за певних умов. Зазвичай міру такого використання ототожнюють із перетворенням однієї форми енергії в іншу. Так, за міру перетворюваності (в літературі її ще називають технічною працездатністю) будь-якого виду енергії прийнято вважати механічну енергію, а умови такого перетворення описувати другим законом термодинаміки. Причому, у випадку ТС «будь-який вид енергії» — це внутрішня енергія або, якщо говорити про її кількість під час теплопередачі, то — теплота. Це пов'язано з тим, що теплота є неупорядкованою формою передачі внутрішньої енергії, що характеризується хаотичним рухом атомів і молекул нагрітого тіла. Тому у процесі її перетворення, наприклад, в механічну енергію частина теплоти витрачається на впорядкування такого руху. Тенденція останніх років [1] — це заміна відомого поняття «технічна працездатність» в оборотному процесі його синонімом — «ексергією», яка введена в термодинаміку в 1956 р. і за фізичним змістом є роботою оборотного циклу, у якого роль холодного джерела теплоти відіграє навколишнє середовище.

З тих пір відбувається ототожнення понять: здатність будь-якої форми енергії до використання прирівнюють до її ексергії. По-перше, такий підхід необ'єктивний до систем, в яких основним завданням є не перетворення теплоти в роботу, а лише зміна її потенціалу — ТА. А по-друге, ексергія не є основним наслідком другого

закону термодинаміки, який говорить передусім про оборотність чи необоротність процесів і кількісну характеристику необоротності — ентропію. Пояснимо це.

Недоліки першого закону, який відповідно до принципу збереження енергії обмежує перебіг процесів, допускаючи тільки перетворення енергії, а не знищення її, компенсує другий закон — допускає не всі види перетворень, а лише перетворення за умови, що реальні процеси можуть проходити тільки в напрямку наростання *необоротності*. В цьому сенсі, другий закон термодинаміки виступає *принципом необоротності*.

У 1824 р. французький інженер Карно ввів у термодинаміку поняття «ідеалізований процес». Таким ідеалізованим процесом є *оборотний процес*. У праці [2] наведено такі визначення:

Якщо систему, у якій проходить процес, можна повернути в початковий стан так, що в зовнішньому середовищі не відбудеться ніяких змін, то такий процес називається *оборотним*.

Якщо перехід у початковий стан системи без змін у зовнішньому середовищі неможливий, то процес називають необоротним.

Відповідно до визначення, оборотність процесу пов'язана не тільки з поверненням системи у вихідний стан (саме це можливо завжди). Важливо, щоб під час перебігу процесу не відбулося ніяких змін і в зовнішньому середовищі (у всіх інших системах, що беруть участь у процесі).

Необоротні процеси поділяють на процеси *вирівнювання та дисипативні*. Перші завжди зумовлені кінцевими різницями тисків, температур або концентрацій, другі головним чином пов'язані з тертям. Наведений матеріал узагальнює *принцип необоротності*:

Всі природні процеси необоротні. Оборотні процеси є лише ідеалізованими граничними випадками необоротних процесів.

Очевидно, об'єктивний термодинамічний метод аналізу повинен базуватися на комплексному використанні обох законів термодинаміки й виходити з того, що досконалість будь-якого реального процесу повинна оцінюватися за ступенем його відхилення від оборотного процесу. На сьогодні існують два різновиди такого термодинамічного методу: ексергетичний (ексергетичних потоків) [1] і ентропійний (вираховування ексергетичних втрат) [3]. В основу кожного покладено використання ексергії як кількісної характеристики оборотних процесів і ексергетичних втрат як кількісної характеристики необоротних процесів.

Особливість ексергетичного методу полягає у підрахунку всіх потоків ексергії у системі та визначенні за ними ексергетичних втрат. Ентропійний метод, навпаки, передбачає вираховування ексергетичних втрат від первинної організованої енергії та від первинної ексергії теплоти, що вводяться в систему.

На нашу думку, такий поділ щонайменш некоректний, оскільки суперечить основному принципу кожного з методів — в основі лежить поняття ексергії. Логічно припустити, що зазначені методи — це лише різні прийоми (способи) деякого циклічного підходу, тобто *спосіб аналізу потоків ексергії та спосіб аналізу ексергетичних втрат*. Перевага того або іншого різновиду значною мірою залежить від системи, яка аналізується.

Поставлене питання досить складне і вимагає фундаментального пояснення. М. Планк довів, що суть другого закону термодинаміки полягає у визнанні існування та в описі необоротних процесів [9]. Відповідно до його міркувань, розглянемо деякий процес, який відбувається самочинно. Цей процес переводить систему з деякого початкового стану *A* у новий стан *B*. Процес або оборотний, або необоротний, третє допущення неможливе. Оборотний він або необоротний — це залежить тільки від властивостей обох станів *A* й *B*, а не від шляху, по якому відбувається процес. Адже в цьому разі необхідно відповісти тільки на питання: чи можливо яким-небудь

способом досягнути повного повернення в стан A після того як досягнуто стан B . Якщо повне повернення з B в A неможливе, то процес необоротний, і тому стан B у природі відрізняється від стану A певними властивостями. Для кількісного запису необоротності необхідна фізична величина, яка б відповідала таким вимогам: повинна безпосередньо визначатися станом системи і не залежати від попередньої її історії подібно до внутрішньої енергії; збільшуватися під час усіх необоротних процесах і залишатися незмінною при всіх оборотних процесах, причому числове значення її збільшення під час деякого процесу повинно характеризувати загальну міру необоротності цього процесу. Р. Клаузиус дійсно знайшов її і назвав *ентропією*.

Відповідно до праці [2] коротко опишемо основні властивості ентропії і її зв'язок із другим законом.

Ентропія є параметром стану, який дає можливість кількісно сформулювати другий закон термодинаміки:

I. *Кожна система характеризується екстенсивним параметром стану — ентропією S , диференціал якої визначається співвідношенням*

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T} = \frac{dU + pdV - \sum_i y_i dX_i}{T}, \quad (6)$$

де T — термодинамічна температура.

Ентропія об'єднаної системи, що складається з підсистем A , B , ..., дорівнює сумі ентропії підсистем:

$$S = S_A + S_B + S_C + \dots \quad (7)$$

II. *Ентропія адіабатної системи не може зменшуватися.* За необоротних процесів ентропія адіабатної системи зростає, за оборотних — залишається постійною:

$$(S_2 - S_1)_{ad} \geq 0. \quad (8)$$

У першій частині цього формулювання другого закону йдеться про існування ентропії як параметра стану і дається спосіб її обчислення.

Отже, ентропія має розмірність [енергія]/[температура]. Одиниця вимірювання ентропії $[S]$ — Дж/К визначається відношенням одиниць вимірювання енергії та температури за Міжнародною системою одиниць СІ. Питома ентропія $s = S/m$ вимірюється в одиницях Дж/(кг·К).

Для питомих величин диференціал питомої ентропії ds простої системи записується у вигляді:

$$ds = \frac{du + pdv}{T} = \frac{dh - vdp}{T} \quad (9)$$

Інтегральне рівняння зміни ентропії справедливе для будь-якої квазістатичної зміни стану 1-2:

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{du + pdv}{T} = \int_1^2 \frac{dh - vdp}{T}. \quad (10)$$

Оскільки ентропія — параметр стану, значення різниці ентропії $s_2 - s_1$ не залежить від вибору шляху інтегрування. Отже, для обчислення $s_2 - s_1$ можна вибрати найзручніший для розрахунку спосіб.

Зміни ентропії у процесі теплообміну можна пояснити так. Ентропія переноситься разом з енергією, що передається у формі теплоти від системи B до системи A . За абсолютною величиною вона дорівнює dQ/T_B і передається від системи B , зменшуючи її ентропію на цю величину. У діатермічній стінці, де відбувається стрибок температур між системами, ентропія також виробляється (генерується) і *вироблена ентропія*:

$$dS_{irrev} = dS_A - |dS_B| = \delta Q \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_B} \right) = \delta Q \frac{T_B - T_A}{T_A T_B}. \quad (11)$$

Ця ентропія збільшує ентропію, яка надходить від системи B , так що система A сприймає ентропію величиною $dS_A = \frac{\delta Q}{T_A} = |dS_B| + dS_{irrev} = \frac{\delta Q}{T_B} + dS_{irrev}$. Це означає, що вироблена ентропія збігається зі збільшенням ентропії загальної адіабатної системи; вона й характеризує необоротність процесу теплообміну.

Перенесення ентропії і виробництво ентропії

Як показано в попередньому прикладі, у процесі теплообміну відбувається спільне перенесення енергії і ентропії через границі системи. Система, яка сприймає або віддає теплоту dQ , відповідно одержує або віддає ентропію, $dS_q = \frac{\delta Q}{T}$, де T — термодинамічна температура системи або, точніше, частини системи, що сприймає або віддають теплоту.

Ентропія dS_q , що переноситься з теплою, має той же знак, що й dQ . Підведення теплоти збільшує ентропію системи, відведення теплоти зменшує її. Через границі адіабатної системи теплота й відповідно ентропія не передаються: *ці границі для теплоти й ентропії непроникні*. При оборотному процесі dS_q збігається зі зміною ентропії системи, $dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T}$.

Зміна ентропії в цих процесах спричинена винятково спільним перенесенням теплоти та ентропії через границі системи. За необоротних процесів ентропія, що переноситься через границі системи, не збігається зі зміною ентропії системи. За другим законом термодинаміки ентропія системи збільшується. Це зростання ентропії є наслідком дисипативних процесів або процесів вирівнювання усередині системи, навіть якщо система адіабатна. Навпаки, зменшення ентропії адіабатної системи неможливе. Тому, очевидно, виникає принципова потреба поділу зміни ентропії неадіабатної системи dS на дві частини: на ентропію dS_q , перенесену через границі системи з теплою, і на ентропію $dS_{irrev} \geq 0$, вироблену в системі. Відтак маємо наступне формулювання другого закону для неадіабатної системи:

зміна ентропії закритої системи складається із двох частин — з ентропії, перенесеної з теплою через границі системи, і з ентропії, що виробляється (генерується) в системі:

$$dS = dS_q + dS_{irrev} = \frac{\delta Q}{T} + dS_{irrev}. \quad (12)$$

Вироблена ентропія завжди позитивна $dS_{irrev} \geq 0$, тобто знищення ентропії неможливе.

На відміну від ентропії системи, перенесена й вироблена ентропії не є параметрами стану, а належать до *характеристик процесу*. Тому в рівнянні

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + (dS_{irrev})_{12} \quad (13)$$

T стосується температури, що змінюється під час процесу, в якому система *сприймає або віддає теплоту* dQ . Інтеграл, що визначає ентропію, перенесену через границі системи, залежить від способу процесу, тобто від того, за якої температури сприймається або віддається теплота. Ентропія $(S_{irrev})_{12} > 0$, вироблена в системі під час процесу, може бути виражена у вигляді різниці значень параметра стану — ентропії — тільки у разі *адіабатної системи*:

$$(S_{irrev})_{12,ad} = (S_2 - S_1)_{ad} \geq 0. \quad (14)$$

Проте такий підхід не означає, що зростання (генерація) ентропії стосується тільки адіабатної системи. Застосовуючи цей принцип до неадіабатної системи, треба лише враховувати властивості границь системи (будь-яка система разом із іншими системами, з якими вона обмінюється теплотою, може утворювати загальну адіабатну систему). А отже, в кожній неадіабатній підсистемі в ході процесу відбувається певна зміна ентропії: $\Delta S_K = S_{K2} - S_{K1}$, $K = A, B, C, \dots$, причому ця зміна може бути позитивною, негативною або дорівнювати нулю. Але сума змін ентропії всіх підсистем, що утворюють загальну адіабатну систему, згідно з другим законом термодинаміки не може бути від'ємною:

$$(S_2 - S_1)_{ad} = \sum_K \Delta S_K \geq 0, \quad (15)$$

де знак нерівності стосується необоротного процесу, а знак рівності — ідеального оборотного процесу.

Баланс ентропії для стаціонарного поточного процесу

Попередні міркування стосувалися закритої системи, тому узагальнимо рівняння (13) на контрольний простір з кількома стаціонарними потоками речовини (рис. 2):

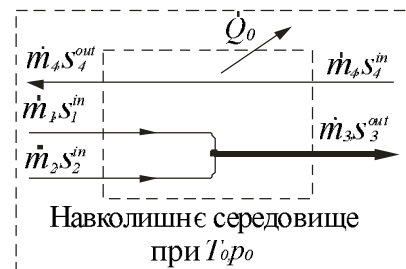


Рис. 2. Відкрита термодинамічна система (контрольний простір)

$$\sum_{out} \dot{m}_i s_i - \sum_{in} \dot{m}_k s_k = \sum_j (\dot{S}_q)_j + \Delta \dot{S}_{irrev}. \quad (16)$$

Ліва частина цього балансового рівняння виражає зміну ентропії всіх потоків речовини між їхнім входом і виходом з контрольного простору. У праву частину рівняння входять джерела цієї зміни ентропії, тобто сума всіх потоків ентропії, яка

переноситься з теплотою, що переходить контрольну поверхню $(\dot{S}_q)_j = \int \frac{\delta \dot{Q}_j}{T_j}$ і потік ентропії, вироблений у контрольному просторі (об'ємі) (внаслідок необоротності процесів завжди позитивний $\dot{S}_{irrev} \geq 0$).

Для адіабатного контрольного простору потоків ентропії, що переносяться з теплотою, немає. Тому

$$\Delta \dot{S}_{irrev} = \left(\sum_{out} \dot{m}_i s_i - \sum_{in} \dot{m}_k s_k \right) \geq 0. \quad (17)$$

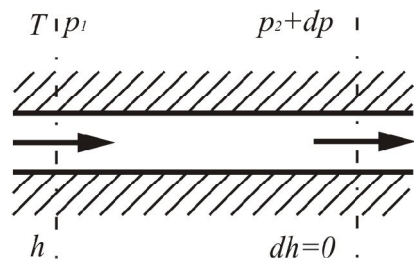


Рис. 3. Падіння тиску в адіабатному стаціонарному потоці

Генерація ентропії під час дисипації механічної енергії

Нехай у системі немає теплообміну між її частинами з різними температурами та навколишнім середовищем. Тоді ентропія виробляється тільки внаслідок дисипативних явищ. Надалі під дисипативними явищами розумітимемо процеси незворотного переходу механічної енергії у внутрішню внаслідок дії внутрішніх сил з деформації в'язкого середовища. Виробництво ентропії в таких процесах дослідимо на прикладі дисипації механічної енергії стаціонарного потоку речовини, що має температуру T (рис. 3).

Аналізуючи рис. 3, можна встановити, що dp має від'ємне значення, $dh = 0$, $TdS = dh - dp = -u dp$. Оскільки для адіабатної системи ентропія, вироблена в дисипативному процесі, збігається із загальним збільшенням ентропії системи, то

$$dS = -\frac{u dp}{T} = dS_{irrev}. \quad (18)$$

Для кількісного вираження енергії, що дисипує усередині системи, вводять поняття *енергії дисипації* $dY = TdS_{irrev}$. Для необоротного процесу за квазістатичних змінах стану системи вона дорівнює:

$$\Psi_{12} = \int_1^2 TdS_{irrev} = \int_1^2 TdS. \quad (19)$$

Енергія дисипації Y_{12} , так само як теплота, робота, перенесена й вироблена ентропії, є характеристикою процесу. За визначенням вона пропорційна виробленій ентропії, тому енергія дисипації, як і вироблена ентропія, не може бути від'ємною $Y_{12} \geq 0$.

Ексергетичний метод термодинамічного аналізу (метод ексергетичних потоків – потенціалів)

В основі ексергетичного методу — поділ енергії на перетворювану частину — *ексергію* та неперетворювану — *анергію* і як наслідок аналіз потенціалу будь-якої форми енергії щодо перетворення її в упорядковану форму, наприклад механічну роботу:

$$\text{Енергія} = \text{Ексергія} + \text{Анергія}$$

Повністю перетворювані (безентропійні) форми енергії складаються виключно з ексергії. Для таких форм поняття енергії і ексергії рівнозначні:

$$\text{електрична енергія} - X = E_{\text{ел}}; A = 0;$$

$$\text{кінетична енергія} - X = E_{\text{к}} = mv^2/2; A = 0;$$

$$\text{потенціальна енергія} - X = E_{\text{к}} = mgz; A = 0;$$

$$\text{механічна робота} - X = W; A = 0.$$

Теплота складається із двох частин: $X_q = 1 - (T_0/T)Q$; $A_q = (T_0/T)Q$, де T_0 — абсолютна температура навколишнього середовища, K ; T — абсолютна температура, за якої відводиться або приймається теплота, K .

Питома ексергія і анергія масового потоку розраховуються за такими рівняннями: $e = h - h_0 + T_0(s - s_0)$, і $a = h_0 + T_0(s - s_0)$, де h і s — питомі ентальпія і ентропія речовини за тиску p і температури T ; h_0 і s_0 — питомі ентальпія і ентропія речовини за досягнення рівноваги з навколишнім середовищем, тобто, за тиску p_0 і температури T_0 навколишнього середовища.

За першим законом термодинаміки баланс відкритої термодинамічної системи зі стаціонарними потоками енергій різної форми має вигляд:

$$\sum (\dot{E} + \dot{A})_i^{in} = \sum (\dot{E} + \dot{A})_i^{out}$$

Оскільки закон збереження стосується тільки енергії, тобто суми ексергії і анергії, то, враховуючи, що будь-яка необоротність спричиняє знищення ексергії, ексергетичний баланс порушується: $\sum \dot{E}_i^{in} \geq \sum \dot{E}_i^{out}$. Знак рівності відноситься до оборотних процесів, знак нерівності — до необоротних. Отже, за всіх необоротних процесів ця нерівність відображає ексергетичні втрати і рівняння ексергетичного балансу може мати:

$$\Delta \dot{E} = \sum \dot{E}_i^{in} - \sum \dot{E}_i^{out}, \quad (20)$$

де $\Delta \dot{E}$ — ексергетичні втрати.

Ефективність перетворення енергії у технічних системах оцінюється за допомогою ексергетичного ККД:

$$\zeta = \frac{\text{Корисно використана ексергія}}{\text{Витрата ексергії}} = 1 - \frac{\text{Втрати ексергії}}{\text{Витрата ексергії}}. \quad (21)$$

Також використовують й інші ексергетичні оцінювальні коефіцієнти: оборотності

$$\phi = \frac{\sum \dot{E}_i^{out}}{\sum \dot{E}_i^{in}} = 1 - \frac{\sum \Delta \dot{E}}{\sum \dot{E}_i^{in}}; \quad (22)$$

необоротності

$$\nu = \frac{\sum \Delta \dot{E}}{\sum \dot{E}_i^{in}}. \quad (23)$$

При цьому $0 \leq \phi \leq 1$, $1 \geq \nu \geq 0$, $\phi + \nu = 1$.

Закінчення статті читайте у наступному номері журналу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бродянский В. М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения — М.: ЭАИ, 1988. — 288 с.
2. Бэр Г. Д. Техническая термодинамика: Пер. с нем. — М.: Мир, 1977. — 518 с.
3. Гохштейн Д. П. Современные методы термодинамического анализа энергетических систем. — М.: Энергия, 1969. — 368 с.
4. Василенко С. М. Аналіз ефективності теплообмінників та підігрівників у структурі теплотехнічного комплексу цукрового виробництва/ С.М. Василенко, С.М. Самійленко [та ін.] // Цукор України. — 2011. — № 2. — С. 27 — 32.
5. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Гурьева Л.В. Оптимизация теплообменных процессов и систем. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 192 с.

6. *Кименов Г.* Рациональное использование топлива и энергии в пищевой промышленности. Пер. с болг. — М.: Агропромиздат, 1990. — 167 с.
7. *Коваленко Л.М., Глушков А.Ф.* Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи. — М.: ЭАИ, 1986. — 240 с.
8. *Осипов А.И., Уваров А.В.* Энтропия и ее роль в науке// Соросовский образовательный журнал. — 2004. — №1. — С. 70—79.
9. *Планк М.* Единство физической картины мира. — М.: Наука, 1966. — 285 с.
10. *Тaubman Е.И., Таубман Е.И.* Анализ и синтез теплотехнических систем/ М.: Энергоатомиздат, 1983. — 176 с.
11. *Хейвуд Р.В.* Термодинамика равновесных процессов: Пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — 492 с.

*С.М. Самийленко, С.М. Василенко,
А.Ф. Буляндра, К.О. Штангеев,
В.В. Шутюк*

**Методологические принципы термодинамического анализа
теплообменных систем сахарного производства. Часть 1**

В статье обобщены и развиты результаты современных научных исследований по термодинамическому анализу теплообменных процессов и систем.

Ключевые слова: термодинамика, теплообмен, процесс, энтропия, эксергия теплоты.

*S. Samiylenko, S. Vasylenko,
O. Buliandra, K. Shtanheev,
V. Shutyuk,*

**Methodological principles of thermodynamics analysis
of heat-exchange systems of saccharine production. Part 1**

In the article the results of world scientific researches from the thermodynamics analysis of heat-exchange processes and systems are generalized and developed.

Key words: thermodynamics, heat exchange, process, entropy, exergy of warmth.

e-mail: schutyuk@i.ua

Надійшла до редколегії 13.03.2012 р.