

Ентропійний метод аналізу енергетичної недосконалості сушильної установки: визначення абсолютних характеристик необоротності

В.В. Шутюк, доктор технічних наук, Національний університет харчових технологій
С.М. Василенко, доктор технічних наук, Національний університет харчових технологій
С.М. Самійленко, кандидат технічних наук, Національний університет харчових технологій
С.А. Бут, кандидат технічних наук, Національний університет харчових технологій

Розроблено комплексну методику аналізу енергетичної ефективності сушильної установки на основі ентропійного методу аналізу енергетичної недосконалості, яка передбачає спільне застосування першого та другого законів термодинаміки. Основою методики є аналіз сушильної установки як єдиної термодинамічної системи з відповідними матеріальними, енергетичними та ентропійними потоками. Розроблена методика ефективна як для оптимізації енергетичних характеристик діючих, так і під час проектування нових сушильних систем.

Ключові слова: сушіння, аналіз, ентропія, необоротність

Разработана комплексная методика анализа энергетической эффективности сушительной установки на основе энтропийного метода анализа энергетического несовершенства, которая предусматривает совместное применение первого и второго законов термодинамики. Основой методики является анализ сушительной установки как единой термодинамической системы с соответствующими материальными, энергетическими и энтропийными потоками. Даная методика эффективна как для оптимизации энергетических характеристик действующих, так и при проектировании новых сушительных систем.

Ключевые слова: сушка, анализ, энтропия, необратимость

We developed the complex methodology of energy efficiency analysis of drying installations on the basis of entropy method of energy inefficiency analysis, which presupposes the use of both the first and the second law of thermodynamics. The methodology is based on the analysis of drying installations as a unified thermodynamic system with its specific material, energy and entropy flows. The methodology we formulated is effective both for optimization of energy characteristics of operating systems and designing the new drying systems.

Keywords: drying, analysis, entropy, irreversibility.

Енергоспоживання України є приблизно вдвічі вищим в порівнянні з західноєвропейськими країнами. Крім того, 90% енергозабезпечення України здійснюється за рахунок технічних джерел енергії – споживання запасів традиційних видів палива (природного газу, кам'яного вугілля, нафти тощо). З огляду на значне споживання енергії під час сушіння, в тому числі харчових продуктів, проблеми впровадження енергоощадних сушильних комплексів та використання для їх енергозабезпечення відновлюваних джерел енергії є пріоритетними у вітчизняній харчовій промисловості [1].

Дослідження складних хіміко-технологічних систем, до числа яких відносяться сушильні установки цукрових заводів із використанням відповідних методів і засобів називають системним аналізом [3, 7]. Кінцева мета системного аналізу - оптимізація хіміко-технологічних систем. Основна складність процедури пошуку оптимальної технологічних систем промислового масшта-

бу - комбінаторна проблема [4]. Так, різноманітність і різнонаправленість варіантів структурних рішень хіміко-технологічних систем призвели до виникнення численних принципів та підходів до їх аналізу й синтезу, з яких можна відокремити два основних напрями:

– пошук оптимальної хіміко-технологічної системи строгими алгоритмічними методами, пов'язаними з розв'язанням складних оптимізаційних завдань;

– використання різних евристичних методів.

У межах кожного із зазначених напрямів аналіз та оптимізацію теплотехнологічних систем і комплексів не можна реалізовувати без апарату прикладної термодинаміки - так званих методів термодинамічного та термоекономічного аналізу.

Загальна характеристика

Термодинамічна інтерпретація завдання оптимізації сушильної установки передбачає наближення реальної системи до гіпотетичної з міні-

мальною необоротністю [5, 6]. Джерелами необоротності реальних процесів є кінцева різниця потенціалів та дисипативні явища. Тому витрату енергії на постійно діючу сушильну установку можна звести до мінімуму за умови забезпечення мінімального падіння потенціалів теплоносіїв у системі.

Альтернативою енергетичному та ексергетичному методам, не маючи при цьому попередньо визначених недоліків, є ентропійний метод аналізу енергетичної недосконалості [2]. Для кількісного визначення необоротності цей метод передбачає застосування виключно ентропії як фундаментальної термодинамічної характеристики.

Для проведення ентропійного аналізу достатньо попередньо відомих термодинамічних параметрів системи, одержаних експериментально або розрахунком. Мінімальна достатня кількість параметрів має бути такою, щоб забезпечити складання матеріального, енергетичного й ентропійного балансів досліджуваної системи. У загальному випадку аналіз зводиться до операцій, які умовно можна поділити на три етапи.

Першим етапом є виділення термодинамічної системи (надалі - система), яку вибирають так, щоб її можна було визначити однозначно. Усе, що перебуває поза системою, розглядають як зовнішнє середовище, яке за потреби також виділяють в окрему систему. При цьому система може бути: *закритою* - межі, не проникні для речовини; *відкритою* (контрольний об'єм) - межі системи, проникні для речовини; *ізолюваною* - межі, які не тільки не проникні для речовини, а й запобігають енергообміну між системою та її зовнішнім середовищем; *адіабатною* - не відбувається теплової взаємодії із зовнішнім середовищем.

Залежно від мети дослідження ентропійний метод аналізу енергетичної недосконалості доцільно застосовувати до адіабатних чи ізолюваних систем (впливає з властивостей ентропії), що для інших систем досягається використанням властивостей меж термодинамічних систем: *ізолюваною також може бути певна система, що взаємодіє із зовнішнім середовищем, якщо вона разом із цим середовищем об'єднується в розширену ізолювану систему.*

На другому етапі для виділеної термодинамічної системи чи її частини, до якої може належати елемент або група елементів, потрібно скласти відповідні баланси. Для аналізу достатньо знати тільки параметри на контрольній поверхні системи.

На третьому етапі для кожної частини, що аналізується, і системи в цілому на основі ентропійного балансу записуються термодинамічні характеристики двох видів - абсолютні й відносні. Абсолютні характеристики показують зростання ентропії від необоротності різних процесів, відносні - ступінь термодинамічної досконалості та відносне значення цієї частини необоротності від-

носно загальної системи. Для складної системи при визначенні ентропійних характеристик корисною властивістю ентропії є її адитивність.

Термодинамічний аналіз проведений ентропійним методом, дає змогу отримувати різносторонню й детальну інформацію про енергетичні перетворення та ТС і її частинах, а також про взаємозв'язки системи з навколишнім середовищем і об'єктами, що перебувають у ньому. Цю інформацію можна використовувати для подальшої роботи над удосконаленням ТС за такими напрямками:

- за абсолютними та відносними характеристиками визначаються вузли недосконалості термодинамічної системи і способи їх усунення - відбувається параметрична термодинамічна оптимізація;
- термодинамічний аналіз безпосередньо пов'язаний із синтезом, тому ентропійний аналіз допомагає вирішувати певні завдання із синтезу нових систем, а також їхньої структурної термодинамічної оптимізації;
- між термодинамічними, технологічними та економічними величинами є певні об'єктивні зв'язки, тому передбачається їх аналітичне встановлення та розв'язання термо-економічних оптимізаційних завдань.

Визначення абсолютних характеристик необоротності

Для складання ентропійних балансів систем чи підсистем різної структури зручно використовувати загальну форму запису рівнянь (усі члени є абсолютними величинами) з врахуванням властивостей ентропії, яка може як підводитись, так і відводитись з потоками теплоносіїв та теплоти, а також зростати від необоротності процесів (рис. 1).

Ліворуч від знаку рівності записують члени, що відображають надходження ентропії до системи, праворуч - її вихід, причому зростання ентропії від необоротності процесів - це додаткове підведення ентропії.

Рівняння (1) є загальною формою запису ентропійного балансу довільної системи зі стаціонарними потоками:

$$\sum_{i=1}^n S_i^{in} + \sum_{k=1}^l S_{Q_k}^{in} + \Delta S_{irrev}^{tot} = \sum_{j=1}^m S_j^{out} + \sum_{h=1}^y S_{Q_h}^{out}, \quad (1)$$

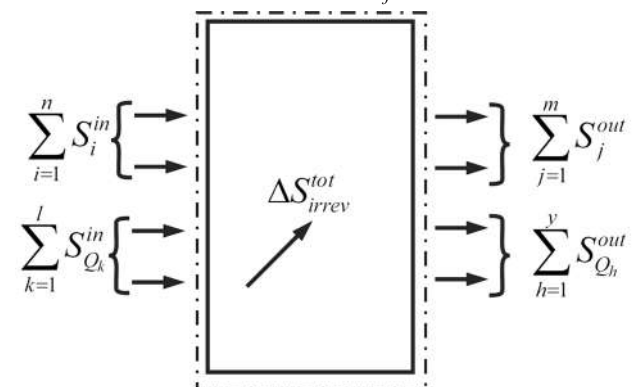


Рис. 1. До складання ентропійного балансу системи зі стаціонарними потоками

ТЕХНІКА & ТЕХНОЛОГІЇ

де $\sum_{i=1}^n S_i^{in} = \sum_{i=1}^n m_i s_i^{in}$ - сумарний потік ентропії з вхідними матеріальними (масовими) потоками, Вт/К; $\sum_{k=1}^l S_{Q_k}^{in} = \sum_{k=1}^l \left(\frac{Q_k}{T_k} \right)$ - сумарний потік ентропії з вхідними потоками теплоти, Вт/К; $-\Delta S_{irrev}^{tot}$ загальне зростання ентропії від необоротності процесів, Вт/К; $-\sum_{j=1}^m S_j^{out} = \sum_{j=1}^m m_j s_j^{out}$ сумарний потік ентропії з вихідними матеріальними (масовими) потоками, Вт/К; $-\sum_{h=1}^y S_{Q_h}^{out} = \sum_{h=1}^y \left(\frac{Q_h}{T_h} \right)$ сумарний потік ентропії з вихідними потоками теплоти, Вт/К.

З рівняння (1) розраховують абсолютну характеристику необоротності:

$$\Delta S_{irrev}^{tot} = \sum_{j=1}^m S_j^{out} - \sum_{i=1}^n S_i^{in} + \sum_{h=1}^y S_{Q_h}^{out} - \sum_{k=1}^l S_{Q_k}^{in}. \quad (2)$$

Для переважної більшості ТТС загальна необоротність визначається чотирма складовими:

$$\Delta S_{irrev}^{tot} = \Delta S_{irrev}^T + \Delta S_{irrev}^D + \Delta S_{irrev}^0 + \Delta S_{irrev}^M, \quad (3)$$

де ΔS_{irrev}^T - зростання ентропії від необоротності теплообміну, Вт/К; ΔS_{irrev}^D - зростання ентропії від дисипації механічної енергії, Вт/К; ΔS_{irrev}^0 - зростання ентропії від необоротності теплообміну між системою та НС, Вт/К; ΔS_{irrev}^M - зростання ентропії від необоротності змішування потоків енергоносіїв з різними характеристиками.

Якщо у системі передбачено спалювання палива, то додатково враховують необоротність перетворення хімічної енергії палива на внутрішню енергію продуктів згоряння.

Задовольняючи прийнятну точність аналізу, методика визначення цієї складової передбачає, що теплотворна здатність палива є безентропійною формою енергії:

$$\Delta S_{irrev}^B = \frac{BQ_{H(B)}^p}{T}, \quad (3)$$

де B - витрата палива; $Q_{H(B)}^p$ - теплота згоряння палива; T - термодинамічна температура продуктів згоряння.

Декомпозиціонування зростання ентропії дає змогу локалізувати вузли недосконалості системи та визначити міру їх впливу на загальну необоротність системи.

За $T = \text{var}$ збільшення ентропії від необоротності дисипації механічної енергії записують у вигляді інтеграла:

$$\Delta S_{irrev}^D = \int_1^2 \frac{\delta E^D}{T}. \quad (4)$$

Якщо ж теплофізичні властивості теплоносіїв у межах зміни температури можна вважати стали-

ми, то рівняння (4) після інтегрування набуває вигляду

$$\Delta S_{irrev}^D = \frac{E^D}{T_m}, \quad (5)$$

де $E^D = V\Delta p$ - енергія дисипації, Вт; V - об'ємна витрата теплоносія, м³/с; Δp - втрати тиску в проточній частині системи, Па; T_m - середньологарифмічна термодинамічна температура теплоносія, К.

Розрізняють також інші способи розрахунку ΔS_{irrev}^D залежно від середовища:

$$\Delta S_{irrev}^D = m\Delta s_{irrev}^D = m \frac{\beta(p^{in} - p^{out})}{\rho}; \quad (6)$$

$$\Delta S_{irrev}^D = m\Delta s_{irrev}^D = mR \ln \frac{p^{in}}{p^{out}}, \quad (7)$$

де m - масова витрата теплоносія, кг/с; p^{in} - тиск теплоносія на вході в систему, Па; p^{out} - тиск теплоносія на виході з системи, Па; β - коефіцієнт об'ємного (термічного) розширення, К⁻¹; ρ - густина теплоносія, кг/м³.

Зростання ентропії від необоротності теплообміну розраховують з балансу ентропії об'єднаної адіабатної системи AB (рис. 2).

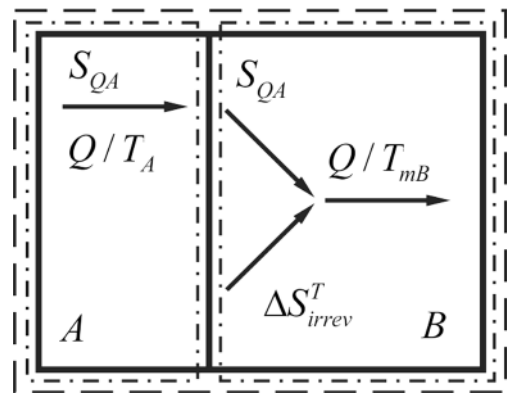


Рис. 2. До розрахунку зростання ентропії від необоротності теплообміну

Якщо в системі A теплообмін супроводжується зміною температури $T_A = \text{var}$, то

$$\Delta S_A = -S_{QA} = -\int_1^2 \frac{\delta Q}{T_A}. \quad (8)$$

Проте за умови, що теплофізичні властивості теплоносіїв у межах зміни температур можна вважати сталими, рівняння (8) спрощується:

$$\Delta S_A = -\frac{Q}{T_{mA}}. \quad (9)$$

де T_{mA} - середньологарифмічна термодинамічна температура теплоносія підсистеми A , К.

Підсистема B сприймає ентропію, що надходить від A , і ентропію, що утворюється на межі між системами:

$$\Delta S_B = S_{QA} + \Delta S_{irrev}^T = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T_B} = \frac{Q}{T_{mB}}, \quad (10)$$

де T_{mB} – середньологарифмічна термодинамічна температура теплоносія підсистеми B , К.

З урахуванням властивостей ентропії рівняння зміни ентропії адиабатної системи AB записують так:

$$\Delta S_{AB} = \Delta S_A + \Delta S_B. \quad (11)$$

Зміна ентропії та її зростання в адиабатній системі рівні, тому рівняння (11) переписують у такому вигляді:

$$\Delta S_{irrev}^T = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T_B} - \int_1^2 \frac{\delta Q}{T_A}. \quad (12)$$

Для більшості випадків аналізу теплотехнічних систем достатньо використовувати спрощене рівняння

$$\Delta S_{irrev}^T = \frac{Q}{T_{mB}} - \frac{Q}{T_{mA}} = \frac{Q(T_{mA} - T_{mB})}{T_{mB} T_{mA}}. \quad (13)$$

Від теплообміну теплотехнічної системи з навколишнього середовища виникає ще одне джерело збільшення ентропії, що у рівнянні (3) характеризується складовою ΔS_{irrev}^0 . Методика розрахунку зростання ентропії від необоротності теплової взаємодії з навколишнім середовищем подібна до розрахунку ΔS_{irrev}^T .

Для підсистеми A (рис. 3) за $T_A = \text{var}$

$$\Delta S_A^0 = -S_{QA}^0 = -\int_1^2 \frac{\delta Q_0}{T_A}, \quad (14)$$

де Q_0 – тепловий потік до навколишнього середовища, Вт.

У спрощеному випадку:

$$\Delta S_A^0 = -\frac{Q_0}{T_{mA}}. \quad (15)$$

Систему C (навколишнє середовище) потрібно розглядати як систему зі сталою температурою T_0 , для якої зміну ентропії розраховують так:

$$\Delta S_C^0 = \frac{Q_0}{T_0}. \quad (16)$$

Таким чином, для об'єднаної ізольованої системи AC рівняння ентропійного балансу має вигляд

$$\Delta S_{irrev}^0 = \frac{Q_0}{T_0} - \int_1^2 \frac{\delta Q_0}{T_A} = \frac{Q_0}{T_0} - \frac{Q_0}{T_{mA}}. \quad (17)$$

Зростання ентропії у процесі змішування потоків енергоносіїв з різними потенціалами в адиабатній системі визначається із частинного випадку загального балансу ентропії (2). Джерелами ентропії є лише потоки речовини:

$$\Delta S_{irrev}^M = \sum_{j=1}^m S_j^{out} - \sum_{i=1}^n S_i^{in}, \quad (18)$$

де m, n – кількість відповідно вихідних і вхідних потоків речовини.

Висновки

Зроблено аналіз енергетичної ефективності су-

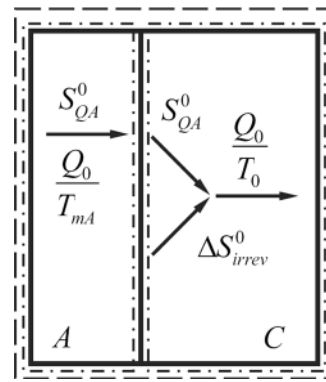


Рис. 3. До розрахунку зростання ентропії від необоротності теплової взаємодії з навколишнім середовищем

шильної установки на основі ентропійного методу аналізу енергетичної недосконалості. Визначені джерела необоротності в сушильних установках і фактори впливу на них дають можливість системно вирішувати завдання з енергозбереження. На основі аналізу розроблено методику аналізу сушильної установки як єдиної термодинамічної системи з відповідними матеріальними, енергетичними та ентропійними потоками. Дана методика ефективна як для оптимізації енергетичних характеристик діючих, так і під час проектування нових сушильних систем. ■

Список використаних джерел

1. Долинский А.А. Оптимизация технических систем методом эксергоэкономики / А.А. Долинский, Б.Х. Драганов, В.А. Дубровин // Промышленная теплотехника. – 2003. – № 4. – С. 28-31.
2. Кименов Г. Рациональное использование топлива и энергии в пищевой промышленности: Пер. с болг. / Г. Кименов – М. : Агропромиздат, 1990. – 167 с.
3. Левин М.Д. Термодинамическая теория и расчет сушильных установок / М.Д. Левин. – М. : Пищепромиздат, 1969. – 282 с.
4. Луценко И.А. Механизм формирования ресурсопотребления в задачах эффективного управления технологическими процессами / И.А. Луценко, Э.С. Гузов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2007. - № 1/2 (25). - С. 112-116.
5. Самойленко С.Н. Методологические основы анализа энергетической эффективности сушильной установки / С.Н. Самойленко, В.В. Шутюк, С.М. Василенко, А.С. Бессараб // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, № 16. – С. 62–69.
6. Перегудов Ф.И. Введение в системный анализ / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко //– М. : Высшая школа, 1989. - 367 с.
7. Shutyuk V. Thermodynamic analysis of heat exchanging appliances / V. Shutyuk, S. Samiylenko, S. Vasylenko // Journal of EcoAgriTourism. – 2013. – Vol. 9, Nr. 1 (26). – P. 62-67.

Примітка. Закінчення статті читайте у наступному номері журналу.