

УДК 536.75:664.1

DOI: 10.15587/2312-8372.2020.202026

**КОМПЛЕКСНИЙ ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ
ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ЦУКРОВОГО
ВИРОБНИЦТВА: МЕТОДИКА АНАЛІЗУ**

Василенко С. М., Самійленко С. М., Бондар В. І., Білик О. А.

**КОМПЛЕКСНЫЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРОИЗВОДСТВА
САХАРА: МЕТОДИКА АНАЛИЗА**

Василенко С. М., Самойленко С. Н., Бондарь В. И., Билык Е. А.

**COMPLEX THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE HEAT-TECHNOLOGICAL
COMPLEX OF SUGAR PRODUCTION: ANALYSIS METHOD**

Vasilenko S., Samiilenko S., Bondar V., Bilyk O.

Об'єктом дослідження є теплотехнологічні системи цукрового виробництва та теплотехнологічний комплекс в цілому. Сучасний цукровий завод є складною ієрархічною системою нерозривно пов'язаних між собою елементів, а його базис – теплотехнологічний комплекс – об'єднує елементи технологічного, теплообмінного, механічного обладнання, в якому одночасно реалізуються, тісно взаємодіючи, складні фізико-хімічні процеси. Враховуючи складність внутрішніх взаємозв'язків процесів, їх параметрів і характеристик, необхідно системно підходити до аналізу реального функціонування, оцінки ефективності та до розв'язання задач оптимізації комплексу в цілому, а також окремих його підсистем і елементів.

У роботі запропоновано методику термодинамічного аналізу теплотехнологічного комплексу цукрового виробництва як єдиної термодинамічної системи, що дозволяє аналізувати основні фактори впливу на енергетичну ефективність комплексу безвідносно до перебігу процесів, що реалізуються всередині системи. В основі методики спільний аналіз загальних синтетичних та аналітичних балансів маси, енергії та ентропії. Ця модель має глибоке фізичне підґрунтя, адже рівняння матеріального балансу є інтегральною формою запису закону збереження кількості речовини, рівняння енергетичного балансу – інтегральною формою запису першого закону термодинаміки, а рівняння ентропійного балансу – інтегральною формою запису другого закону термодинаміки. Основне завдання методики – швидка оцінка досконалості теплотехнологічного комплексу та його визначення «енергозберігаючого потенціалу». Також застосування принципу енергетичної компенсації необоротності та ентропійних критеріїв дозволяють визначити джерела та причини недосконалості систем, а складені рейтинги недосконалостей

допомагають розробити систему заходів підвищення ефективності комплексу оптимальної послідовності. Тому запропонована методика термодинамічного аналізу, на відміну від методик, в основі яких ексергетичні характеристики, забезпечує комплексний аналіз, оперуючи лише фундаментальними законами та принципами класичної термодинаміки. А також може бути застосована як для оптимізації енергетичних характеристик діючих, так і під час проектування нових підприємств цукрової промисловості.

Ключові слова: енергетична ефективність, необоротність процесів, термодинамічний аналіз, ентропійний метод, ресурсозбережні заходи.

Объектом исследования являются теплотехнологические системы сахарного производства и теплотехнологический комплекс в целом. Современный сахарный завод является сложной иерархической системой неразрывно связанных между собой элементов, а его базис – теплотехнологический комплекс – объединяет элементы технологического, теплообменного, механического оборудования, в котором одновременно реализуются, тесно взаимодействуя, сложные физико-химические процессы. Учитывая сложность внутренних взаимосвязей процессов, их параметров и характеристик, необходимо системно подходить к анализу реального функционирования, оценки эффективности и к решению задач оптимизации комплекса в целом, а также отдельных его подсистем и элементов.

В работе предложена методика термодинамического анализа теплотехнологического комплекса сахарного производства как единой термодинамической системы, позволяющей анализировать основные факторы влияния на энергетическую эффективность комплекса безотносительно к ходу процессов, реализуемых внутри системы. В основе методики совместный анализ общих синтетических и аналитических балансов массы, энергии и энтропии. Эта модель имеет глубокое физическое основание, ведь уравнение материального баланса является интегральной формой записи закона сохранения количества вещества, уравнение энергетического баланса – интегральной формой записи первого закона термодинамики, а уравнение энтропийного баланса – интегральной формой записи второго закона термодинамики. Основная задача методики – быстрая оценка совершенства теплотехнологического комплекса и его определение «энергосберегающего потенциала». Также применение принципа энергетической компенсации необратимости и энтропийных критериев позволяют определить источники и причины несовершенства систем, а составленные рейтинги несовершенств помогают разработать систему мер повышения эффективности комплекса оптимальной последовательности. Поэтому предложенная методика термодинамического анализа, в отличие от методик, в основе которых эксергетические характеристики, обеспечивает комплексный анализ, оперируя только фундаментальными законами и принципами классической термодинамики. А также может быть применена как для оптимизации энергетических характеристик действующих, так и при проектировании новых предприятий сахарной промышленности.

Ключевые слова: *энергетическая эффективность, необратимость процессов, термодинамический анализ, энтропийный метод, ресурсосберегающие мероприятия.*

1. Вступ

Головною методичною проблемою під час впровадження ресурсозбережних заходів на підприємствах цукрової промисловості є відсутність об'єктивних показників оцінки енергетичної ефективності. Процедура аналізу та оптимізації теплотехнологічного комплексу (ТТК) вимагає не лише визначення сукупності абсолютних енергетичних характеристик функціонування комплексу, а й встановлення критеріїв, які б комплексно та однозначно характеризували енергетичні перетворення, властиві саме системам цукрового виробництва. Очевидно, що такі критерії повинні бути науково обґрунтованими та відповідати фундаментальним принципам загальної методології оптимізації теплообмінних процесів і систем, в основі якої – беззаперечний факт існування необоротності як фізичного джерела неефективності технічних систем. Тому актуальним є розроблення комплексної методики термодинамічного аналізу та оптимізації ТТК цукрового виробництва, включаючи оцінку термодинамічної недосконалості комплексу, встановлення зв'язків між термодинамічною недосконалістю та енергетичною ефективністю, а також визначення потенціалу ресурсозбереження типових підприємств.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є теплотехнологічні системи цукрового виробництва та теплотехнологічний комплекс в цілому. *Предметом дослідження* є необоротні процеси перетворення енергії різних форм у теплотехнологічному комплексі цукрового виробництва.

Сучасний цукровий завод є складною ієрархічною системою нерозривно пов'язаних між собою елементів, а його базис – ТТК – об'єднує елементи технологічного, теплообмінного, механічного обладнання, в якому одночасно реалізуються, тісно взаємодіючи, складні фізико-хімічні процеси.

На ряді підприємств питома витрата умовного палива тільки на технологічні потреби наближається до рівня 3 % до маси буряків. Таким чином, підприємства мають потужний потенціал щодо «енергозбереження», а отже, раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) може забезпечити значний економічний ефект, у першу чергу за рахунок здешевлення експлуатаційних витрат на паливо та електроенергію і, як наслідок, зниження собівартості цукру.

Успішна реалізація такого завдання можлива за умови забезпечення ефективного використання усіх видів енергії на відповідних етапах технологічного процесу.

Одним з найбільш проблемних місць є складність внутрішніх взаємозв'язків між системами, процесами, їх параметрами та характеристиками. Це вимагає системного підходу до аналізу реального функціонування, оцінки ефективності та до розв'язання задач оптимізації ТТК цукрового заводу в

цілому, а також окремих його підсистем і елементів.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є розроблення комплексної методики термодинамічного аналізу ТТК на базі загальних енергетичних та ентропійних балансів комплексу.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Розробити загальновиробничі матеріальні, енергетичні та ентропійні баланси ТТК цукрового виробництва.
2. Розробити методику побудови рейтингів недосконалості підсистем ТТК.
3. Встановити кількісний взаємозв'язок між необоротністю процесів і енергетичною ефективністю ТТК.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Починаючи з 70-х років ХХ століття ведуться численні дослідження, спрямовані як на визначення загальних законів і властивостей оптимальних хіміко-технологічних систем, так і на розробку методів їх аналізу та синтезу, серед яких методи термодинамічного аналізу. Більшість сучасних робіт представлена енергетичним та ексергетичним аналізом теплових машин [1]. Зокрема автори публікацій [2, 3] успішно дослідили альтернативні технології покращення термодинамічних характеристик енергогенеруючих систем на базі органічного циклу Ренкіна. Цікавими також є роботи [4, 5] з термодинамічного моделювання та економічного аналізу систем когенерації та тригенерації, у тому числі й у цукровому виробництві. Альтернативний варіант термодинамічного аналізу викладений в [6], однак у цій роботі показано ентропійний аналіз лише теплообмінника. Останні роки, запозичуючи досвід термодинамічного аналізу теплових машин, вчені адаптують ексергетичний метод до аналізу теплотехнологічних систем цукрового виробництва [7, 8]. Автори роботи [9] наголошують на тому, що мінімізація втрат енергії є потужним інструментом для розробки та управління процесами ефективного використання енергії. Також, у роботі [10] представлено ексергетичний аналіз процесів виробництва цукру-сирцю із цукрової тростини, але не зрозуміло чи можна використовувати результати аналізу для традиційної технології. Проте у роботі [11] показано, що незважаючи на популярність ексергетичного методу, його застосування у цукровому виробництві ускладнюється термодинамічною некоректністю аналізу теплових процесів за допомогою гіпотетичних втрат роботоздатності внаслідок необоротності.

Таким чином, результати аналізу дозволяють зробити висновок про необхідність використання другого закону термодинаміки в сучасному аналізі енергетичної ефективності ТТК цукрового виробництва, але практичну реалізацію цього завдання доцільно виконати на базі ентропійного аналізу. На думку авторів, першим етапом дослідження енергетичної ефективності ТТК має бути спільний аналіз загальних синтетичних та аналітичних балансів маси, енергії та ентропії, що дозволить оцінити реальну досконалість комплексу та визначити перспективи оптимізації.

5. Методи дослідження

Передбачається, що аналіз виконується у кілька етапів, серед яких можна виділити основні:

1. Визначаються параметри всіх потоків речовин та енергії, що беруть участь в енергетичних перетвореннях.

2. Складаються, розраховуються та аналізуються *енергетичні* та *ентропійні* баланси підсистем, систем та комплексу в цілому.

3. На основі визначених енергетичних та ентропійних характеристик записуються критерії ефективності, за результатами аналізу яких робляться висновки про ефективність та причини неефективності від процесу до комплексу загалом.

Не зважаючи на те, що детальний термодинамічний аналіз ТТК є найефективнішим, його застосування не завжди виправдане, оскільки реалізація вимагає значних часових та ресурсних затрат і високої кваліфікації інженера. Особливо це стосується випадків, коли необхідно швидко визначити енергетичну ефективність реального підприємства чи порівняти між собою кілька альтернативних проектів.

6. Результати дослідження

У даній роботі представлено методику термодинамічного аналізу ТТК цукрового виробництва, коли підприємство розглядається як єдина відкрита термодинамічна система з відповідними потоками речовини та енергії, що перетинають її границі (рис. 1). Таке представлення, не вдаючись у подробиці процесів, що реалізуються всередині системи, дає можливість зв'язати підведені до системи паливно-енергетичні ресурси (ПЕР) із джерелами їх втрат.

У цьому сенсі важливим інструментом аналізу ефективності використання ПЕР можуть стати *загальнопромислові баланси* (ЗБ). Надалі під ЗБ розумітимемо систему рівнянь матеріального, енергетичного та ентропійного балансів, записані для ТТК в цілому. Тобто, якщо записати замкнену систему аналітичних матеріальних, енергетичних та ентропійних балансів для всіх взаємопов'язаних елементів ТТК, то вона спроститься до єдиного ЗБ, складовими якого будуть потоки, не зав'язані всередині системи, а такі, що пов'язують ТТК з навколишнім середовищем (НС).

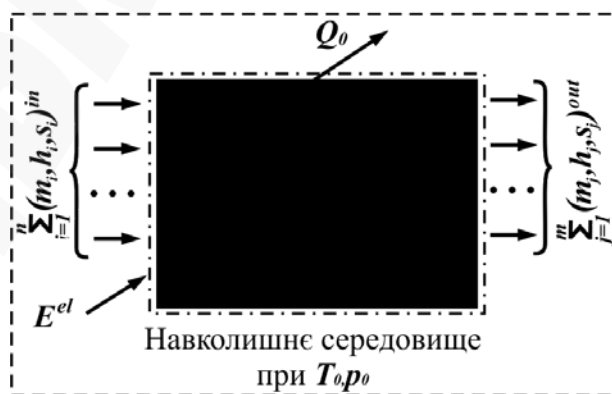


Рис. 1. Теплотехнологічний комплекс, як єдина термодинамічна система

Як буде показано далі, такі баланси наочно дають можливість визначити основні шляхи зниження витрати ПЕР та визначити ефективність їх впровадження.

Залежно від мети складання, ЗБ можуть бути *фактичними* чи *розрахунковими*. Так, при складанні *фактичних ЗБ* за звітними даними визначаються всі матеріальні, енергетичні та ентропійні потоки, що надходять в підприємство й залишають його. А також розраховується підсумкова величина необоротних «вtrat» енергії, абсолютні та відносні показники термодинамічної ефективності.

Для складання ж *розрахункового ЗБ* матеріальні потоки та енергетичні втрати визначаються, як і при складанні аналітичних балансів, або ж за результатами фактичного балансу, або ж за загальноузгодженими методиками чи рекомендаціями. Після цього розраховуються енергетичні та ентропійні потоки, в результаті балансування яких визначають витрату енергії на виробництво, абсолютні та відносні показники термодинамічної ефективності.

Складаючи ЗБ ТТК, зручно користуватися такою формою запису рівнянь, коли всі члени є абсолютними величинами. З лівої сторони рівняння записуються члени, що відображають прибуткову складову балансу, праворуч – витратну.

Для ТТК форма запису витратної складової обумовлює необхідність поділу ЗБ на синтетичні та аналітичні. Пояснимо це.

Відповідно до визначення, синтетичний баланс встановлює рівність між надходженням та витратою (ПЕР чи енергії). А отже, загальновиробничі синтетичні баланси (ЗСБ) матимуть наступний вигляд (рис. 2):

– загальний матеріальний баланс:

$$\begin{aligned} \Sigma D_n + W_{\text{бв}} + G_{\text{стр}} + G_{\text{в}} + G_{\text{сг}} + G_{\text{нов}}^{\text{in}} = D_{\text{уп}} + W_{\text{кон}} + W_{\text{над}} + \\ + W_{\text{сам}} + G_{\text{ц}} + G_{\text{жс}} + G_{\text{м}} + G_{\text{фо}} + G_{\text{нов}}^{\text{out}}, \end{aligned} \quad (1)$$

де ΣD_n – пара на технологічні потреби, кг/т; $W_{\text{бв}}$ – барометрична вода, кг/т; $G_{\text{стр}}$ – стружка, кг/т; $G_{\text{в}}$ – вапно, кг/т; $G_{\text{сг}}$ – сатураційний газ, кг/т; $G_{\text{нов}}^{\text{in}}$ – повітря на вході в ТТК, кг/т; $D_{\text{уп}}$ – утфельна пара, кг/т; $W_{\text{кон}}$ – конденсат, кг/т; $W_{\text{над}}$ – надлишкова вода, кг/т; $W_{\text{сам}}$ – втрати води на сатурації, кг/т; $G_{\text{ц}}$ – цукор, кг/т; $G_{\text{жс}}$ – жом, кг/т; $G_{\text{м}}$ – меляса, кг/т; $G_{\text{фо}}$ – фільтраційний осад, кг/т; $G_{\text{нов}}^{\text{out}}$ – повітря на виході з ТТК, кг/т;

– загальний водний баланс:

$$\begin{aligned} \Sigma D_n + W_{\text{бв}} + G_{\text{стр}}(1 - CP_{\text{стр}}) = D_{\text{уп}} + W_{\text{кон}} + W_{\text{над}} + W_{\text{сам}} + \\ + W_{\text{нов}} + G_{\text{жс}}(1 - CP_{\text{жс}}) + G_{\text{м}}(1 - CP_{\text{м}}) + G_{\text{фо}}(1 - CP_{\text{фо}}), \end{aligned} \quad (2)$$

де $W_{\text{нов}}$ – вода, що виводиться із заводу з повітрям, кг/т; CP_i – сухі речовини i -го потоку; – енергетичний ЗСБ:

$$\begin{aligned} H_n + H_{\text{бв}} + H_{\text{стр}} + H_{\text{в}} + H_{\text{сг}} + H_{\text{нов}}^{\text{in}} + E_{\text{ел}} = H_{\text{уп}} + H_{\text{кон}} + \\ + H_{\text{над}} + H_{\text{сам}} + H_{\text{ц}} + H_{\text{жс}} + H_{\text{м}} + H_{\text{фо}} + H_{\text{нов}}^{\text{out}} + Q_0, \end{aligned} \quad (3)$$

де H_i – потокова ентальпія i -го потоку при відповідній температурі, з якою потік входить чи виходить з ТТК; Q_0 – загальні «втрати» теплоти в навколишнє

середовище з поверхні теплотехнологічного обладнання;

– ентропійний ЗСБ (складаємо відповідно до властивостей ентропії, за яких остання може як підводитись, так і відводитись з потоками теплоносіїв та теплоти, а також зростати від необоротності процесів):

$$S_n + S_{\text{бв}} + S_{\text{смп}} + S_e + S_{\text{сз}} + S_{\text{нов}}^{\text{in}} + \sum \Delta S_{\text{irrev}}^s = S_{\text{yn}} + S_{\text{кон}} + S_{\text{над}} + S_{\text{сам}} + S_{\text{ц}} + S_{\text{жс}} + S_{\text{м}} + S_{\text{фо}} + S_{\text{нов}}^{\text{out}} + S_0, \quad (4)$$

де S_i – потокова ентропія i -го потоку при відповідній температурі, з якою потік входить чи виходить з ТТК; $\sum \Delta S_{\text{irrev}}^s$ – зростання ентропії від необоротності процесів у ТТК, розраховане за синтетичним балансом; $S_0 = Q_0/T_0$ – зміна ентропії навколишнє середовище.

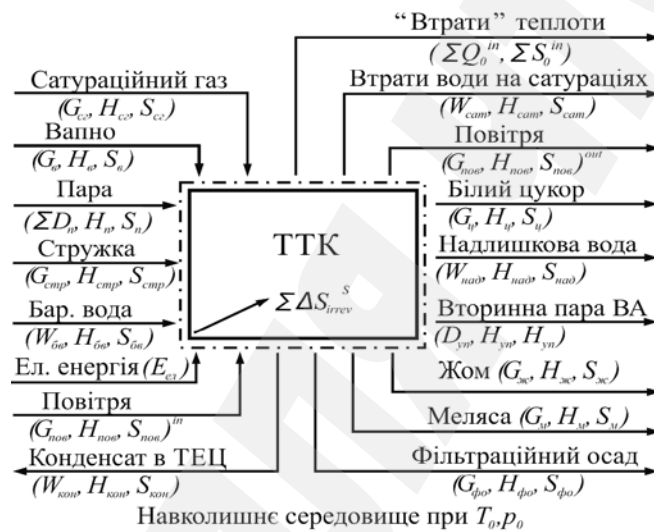


Рис. 2. Схема потоків речовини, енергії та ентропії в теплотехнологічному комплексі (ТТК) для складання загальновиробничих синтетичних балансів (ЗСБ): ТЕЦ – теплоелектроцентрально, ВА – випарний апарат

Мета аналітичного балансу – визначення глибини та характеру використання ПЕР. Тому у випадку ТТК загальновиробничі аналітичні баланси (ЗАБ) визначатимуть розподіл підведених ПЕР на «корисно використані» в даній термодинамічній системі та на «втрати» в НС. Запишемо енергетичний та ентропійний ЗАБ відповідно до рис. 3; матеріальний баланс буде ідентичний балансу (1).

Енергетичний ЗАБ має вигляд:

$$H_n + H_{\text{бв}} + H_{\text{смп}} + H_e + H_{\text{сз}} + H_{\text{нов}}^{\text{in}} + E_{\text{ел}} = H_{\text{yn}}(T_0) + H_{\text{кон}}(T_{\text{кон}}) + H_{\text{над}}(T_0) + H_{\text{сам}}(T_0) + H_{\text{ц}}(T_0) + H_{\text{жс}}(T_0) + H_{\text{м}}(T_0) + H_{\text{фо}}(T_0) + H_{\text{нов}}^{\text{out}}(T_0) + \sum Q_0. \quad (5)$$

У рівнянні (5) сумарні «втрати» теплоти, що включають «втрати» теплоти з поверхні теплотехнологічного обладнання ($\sum Q_0^{\text{in}}$) та з вторинних енергоресурсів (ВЕР), які, виходячи з ТТК, мають температуру більшу від температури НС ($\sum Q_0^{\text{BEP}}$), розраховуються за наступним рівнянням:

$$\sum Q_0 = \sum Q_0^{\text{in}} + \sum Q_0^{\text{BEP}}. \quad (6)$$

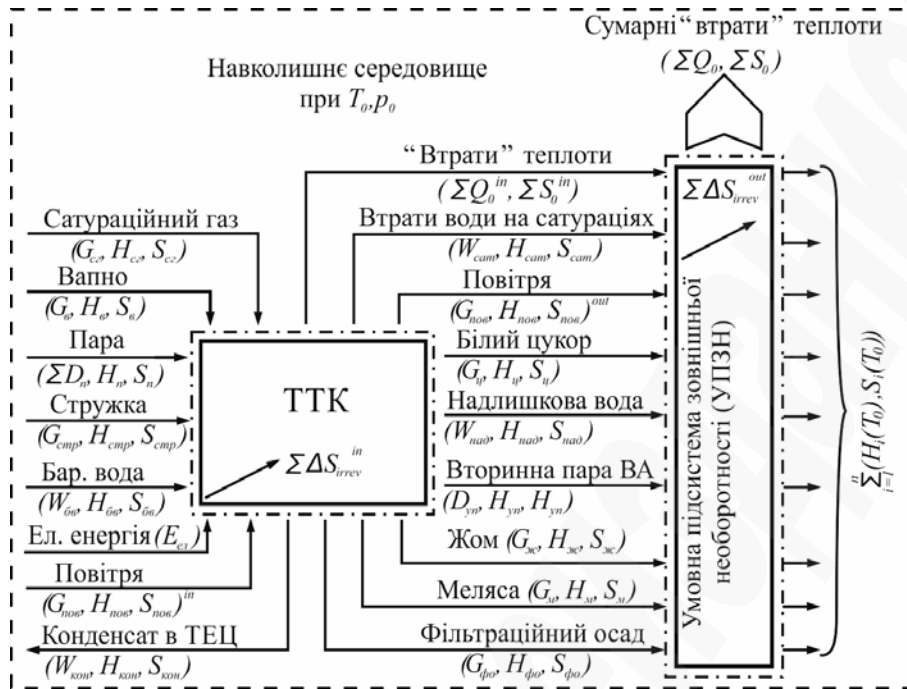


Рис. 3. Схема потоків енергії та ентропії для складання загальнопромислових аналітичних балансів теплотехнологічного комплексу (ЗАБ ТТК) цукрового заводу: ТЕЦ – теплоелектроцентрально, ВА – випарний апарат

Якщо енергію вхідних потоків ВЕР підсистеми умовної системи зовнішньої необоротності (УПЗН) позначити як $\sum H_i(T_i)$, а вихідних – $\sum H_i(T_0)$, то «втрати» теплоти з ВЕР визначатимуться рівнянням:

$$\sum Q_0^{BEP} = \sum H_i(T_i) - \sum H_i(T_0). \quad (7)$$

Ентропійний ЗАБ:

$$S_n + S_{бв} + S_{сmp} + S_e + S_{сз} + S_{нов}^{in} + \sum \Delta S_{irrev}^{tot} = S_{yn}(T_0) + S_{кон}(T_{кон}) + S_{над}(T_0) + S_{cam}(T_0) + S_{ц}(T_0) + S_{жс}(T_0) + S_{м}(T_0) + S_{фo}(T_0) + S_{нов}^{out}(T_0) + \sum S_0, \quad (8)$$

де $\sum S_0 = \sum Q_0/T_0$ – ентропія, що надходить до НС з сумарними «втратами» теплоти; $\sum \Delta S_{irrev}^{tot}$ – загальне зростання ентропії при взаємодії ТТК з НС.

Підставивши рівняння (6), (7) в (5) та скоротивши подібні, отримаємо рівняння енергетичного ЗСБ (3). На перший погляд, математична подібність матеріальних та енергетичних балансів свідчить про нераціональність ЗАБ. Проте нескладний аналіз ентропійних рівнянь ЗСБ (4) та ЗАБ (8) показує відмінність у числовому значенні зростання ентропії. Так, $\sum \Delta S_{irrev}^s$ характеризує внутрішню необоротність процесів ТТК і необоротність, що спричинена тепловіддачею з поверхні теплотехнологічного обладнання до НС ($\sum \Delta S_{irrev}^0$):

$$\sum \Delta S_{irrev}^s = \sum \Delta S_{irrev}^{in} + \sum \Delta S_{irrev}^0. \quad (9)$$

А $\sum \Delta S_{irrev}^{tot}$ є числовою характеристикою повної необоротності об'єднаної

системи ТТК+НС, яку доцільно розділити на дві складові:

$$\sum \Delta S_{irrev}^{tot} = \sum \Delta S_{irrev}^{in} + \sum \Delta S_{irrev}^{out}, \quad (10)$$

де $\sum \Delta S_{irrev}^{in}$ – зростання ентропії від необоротності внутрішніх процесів ТТК – «внутрішня необоротність»; $\sum \Delta S_{irrev}^{out}$ – зростання ентропії від необоротної взаємодії теплоти ВЕР та теплоти «втрат» з поверхні теплотехнологічного обладнання з НС – «зовнішня необоротність».

Для визначення $\sum \Delta S_{irrev}^{in}$ запишемо баланс ентропії термодинамічної підсистеми ТТК (рис. 3). При цьому вважаємо, що теплота $\sum Q_0^{in}$ виходить із системи, не змінюючи початкового потенціалу (трансформація відбувається в УПЗН):

$$S_n + S_{бв} + S_{cmp} + S_e + S_{ce} + \sum \Delta S_{irrev}^{in} = S_{yn} + S_{кон} + S_{над} + S_{cam} + S_u + S_{жс} + S_M + S_{фo} + \sum S_0^{in}, \quad (11)$$

де $\sum S_0^{in} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_{0_i}^{in}}{T_j}$ – потік ентропії з підсистеми ТТК до підсистеми УПЗН.

$\sum \Delta S_{irrev}^{out}$ визначається з балансу підсистеми УПЗН (рис. 3):

$$S_{yn} + S_{над} + S_{cam} + S_u + S_{жс} + S_M + S_{фo} + \sum S_0^{in} + \sum \Delta S_{irrev}^{out} = S_{yn}(T_0) + S_{над}(T_0) + S_{cam}(T_0) + S_u(T_0) + S_{жс}(T_0) + S_M(T_0) + S_{фo}(T_0) + \sum S_0. \quad (12)$$

Відтак, можемо підсумувати, що практичне значення при комплексному ентропійному аналізі ефективності енерговикористання ТТК має ентропійний ЗАБ, оскільки дозволяє розрахувати загальну необоротність об'єднаної системи ТТК+НС, що має аналітичний зв'язок з витратою палива та T_0 .

Очевидно, введенні поняття «внутрішня необоротність» та «зовнішня необоротність» ефективні при локалізації джерел необоротності – споживачів палива. Для визначення міри впливу складових рівняння (10) на загальне зростання ентропії можна використовувати наступні коефіцієнти:

$$\omega^{in} = \sum \Delta S_{irrev}^{in} / \sum \Delta S_{irrev}^{tot}, \quad (13)$$

$$\omega^{out} = \sum \Delta S_{irrev}^{out} / \sum \Delta S_{irrev}^{tot}. \quad (14)$$

Важливим етапом термодинамічного аналізу є побудова рейтингів недосконалостей підсистем ТТК – «пірамід недосконалості». Такі гіпотетичні категорії дозволяють оцінити вплив окремих компонентів на ефективність загальної системи та розробити компенсаційні заходи оптимальної послідовності. Зважаючи на адитивність ентропії, методика базується на використанні відносних коефіцієнтів необоротності:

$$\omega_j = \frac{\Delta S_{irrev_j}}{\sum \Delta S_{irrev}}, \quad (15)$$

де ΔS_{irrev_i} – зростання ентропії від необоротності процесів у i -й підсистемі;
 $\sum \Delta S_{irrev}$ – зростання ентропії від необоротності процесів у загальній системі,
 компонентом якої є об'єкт аналізу.

Для максимальної локалізації необоротностей розрвнятимемо 3 групи рейтингів:

1) «внутрішня піраміда недосконалості»:

$$\omega_i^{in} = \frac{\Delta S_{irrev_i}^{in}}{\sum \Delta S_{irrev}^{in}}, \quad (16)$$

де $\Delta S_{irrev_i}^{in}$ – зростання ентропії від необоротності процесів у i -й підсистемі ТТК;

2) «зовнішня піраміда недосконалості»:

$$\omega_i^{out} = \frac{\Delta S_{irrev_i}^{out}}{\sum \Delta S_{irrev}^{out}}, \quad (17)$$

де $\Delta S_{irrev_i}^{out}$ – зростання ентропії від необоротної взаємодії i -го потоку ВЕР з НС
 (від необоротності процесів у зовнішній умовній системі УПЗН);

3) «загальна піраміда недосконалості»:

$$\omega_i^{tot} = \frac{\Delta S_{irrev_i}^{tot}}{\sum \Delta S_{irrev}^{tot}}. \quad (18)$$

Для визначення термодинамічної недосконалості підсистем та систем ТТК пропонуємо використовувати *ентропійний коефіцієнт недосконалості* [1]:

$$\eta_s^{imp} = \frac{\Delta S_{irrev}^{tot}}{\Delta S_{irrev}^{max}}, \quad (19)$$

де ΔS_{irrev}^{tot} – загальне зростання ентропії в системі у результаті необоротності процесів, що в ній реалізуються, Вт/К; ΔS_{irrev}^{max} – максимально можливе зростання ентропії в системі, Вт/К.

Знаменник коефіцієнта (19) відіграє роль потенціалу та визначається із наслідків другого закону термодинаміки: у необоротних процесах перехід системи до рівноважного стану відбувається зі зростанням ентропії до деякого максимального значення.

Наприклад, для енергії потоку речовини, що надходить у підсистему А (рис. 4 і бере участь у енергетичних перетвореннях, максимальне спрацювання потенціалів можливе під час необоротного теплообміну з НС (підсистема С)). При цьому спрацювання тиску досягається за рахунок дисипативних явищ, після чого енергія дисипації у вигляді теплоти переходить на температурний рівень НС. Це означає, що ΔS_{irrev}^{max} , як результат взаємодії уявної системи з НС,

кількісно характеризує імовірну максимальну необоротність процесів у системі при переході зі стану 1 у стан 2. Очевидно, таку термодинамічну величину можна назвати *потенційною необоротністю процесів*, аналітичний вираз для якої у випадку стаціонарного потоку записується із балансу ентропії об'єднаної термодинамічної системи АС (рис. 4):

$$\Delta S_{irrev}^{max} = (S_2 - S_1) + \frac{|Q|_1^2}{T_0} + \frac{|E^D|_1^2}{T_0}, \quad (20)$$

де $|Q|_1^2 = U_1 - U_2$ – тепловий потік до НС при зміні температури потоку від T_1 до T_2 ; $|E^D|_1^2 = V(p_1 - p_2)$ – тепловий потік до НС при дисипації механічної енергії потоку (зміна тиску від p_1 до p_2).

Очевидно, рівняння (20) можна переписати в більш традиційному вигляді:

$$\Delta S_{irrev}^{max} = (S_2 - S_1) + \frac{H_1 - H_2}{T_0}. \quad (21)$$

Застосування НС як окремої, незалежної термодинамічної системи є невід'ємною складовою аналізу на основі другого закону термодинаміки. В цьому сенсі термодинамічній температурі НС T_0 відведена роль базової координати при визначенні технічної цінності енергії різних потенціалів.

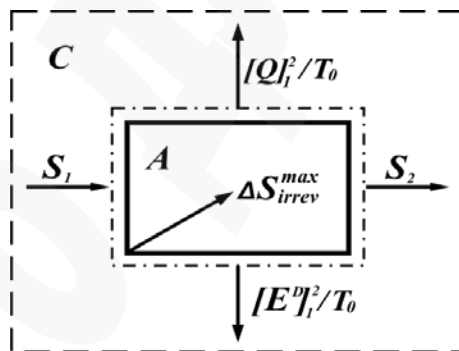


Рис. 4. Гіпотетична система

Для визначення T_0 розглянемо оборотну взаємодію ТТК з НС. Очевидно, такий граничний випадок передбачає максимальну енергетичну ефективність, яка, у свою чергу, не можлива без повного використання теплоти ВЕР. Таким чином, ідеальна система включатиме лише холодні потоки – споживачі енергії, які у загальному випадку представлені стружкою, барометричною водою та атмосферним повітрям.

Оскільки оборотна тепла взаємодія у нециклічному вигляді можлива лише в ізотермічному процесі, а загальна зміна ентропії об'єднаної адіабатної системи ТТК+НС запишеться так:

$$S_0^{TTK} + S_0 = 0, \quad (22)$$

або

$$\frac{Q_0}{T_0} - \frac{Q_0}{T_{ev}^{TTK}} = 0, \quad (23)$$

то $T_0 = T_{ev}^{TTK}$.

У рівнянні (23) T_{ev}^{TTK} – середньозважена термодинамічна температура холодних потоків, К. Тобто, у загальному випадку T_0 можемо визначити з рівняння теплового балансу:

$$H_{\delta\delta}(T_{\delta\delta}) + H_{cnp}(T_{cnp}) + H_{нов}^{in}(T_{нов}) = H_{\delta\delta}(T_0) + H_{cnp}(T_0) + H_{нов}^{out}(T_0). \quad (24)$$

Права частина рівняння (24) записана у скороченому вигляді з метою спрощення розрахунків.

Подібний результат можна отримати, склавши ентропійний ЗАБ за попередніх умов. Для повної відповідності запишемо рівняння у розгорнутому вигляді:

$$S_{\delta\delta}(T_{\delta\delta}) + S_{cnp}(T_{cnp}) + S_{нов}^{in}(T_{нов}) = S_{yn}(T_0) + S_{над}(T_0) + S_{cam}(T_0) + S_{\psi}(T_0) + S_{ж}(T_0) + S_{м}(T_0) + S_{\phi o}^w(T_0) + S_{нов}^{out}(T_0), \quad (25)$$

де $S_{\phi o}^w(T_0)$ – ентропія води, що міститься у фільтраційному осаді при температурі НС.

Вище визначені абсолютні характеристики необоротності різного змісту дають можливість встановити аналітичний зв'язок між зростанням ентропії, температурою НС та витратою енергії чи палива на технологічний процес. Зважаючи на термодинамічну специфіку такого зв'язку (працює другий закон термодинаміки), тезу попереднього речення доцільно сформулювати більш коректно: *енергія витрачається на компенсацію необоротності процесів ТТК*. Такий підхід відкриває нові можливості в системному термодинамічному аналізі. Розглянемо детальніше.

У загальному вигляді енергетичні перетворення цукрового підприємства можна представити таким чином, що ТЕЦ – джерело відповідних форм енергії, а ТТК і НС – гігантський теплообмінник максимальної необоротності (рис. 5).

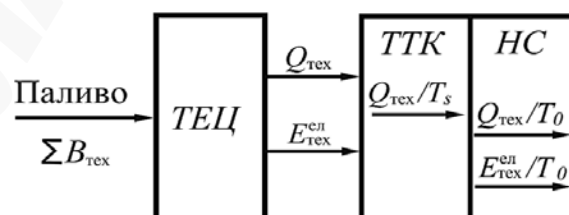


Рис. 5. Загальні енергетичні та ентропійні перетворення цукрового підприємства

Відповідно до класичних міркувань, основна частина палива, що надходить у ТЕЦ ($\sum B_{тех}$), витрачається на генерацію теплоти ($Q_{тех}$) та

електричної енергії ($E_{\text{тех}}^{\text{ел}}$), які необхідні для здійснення технологічного процесу. Розділимо $\sum B_{\text{тех}}$ на дві складові й встановимо зв'язок з відповідними енергетичними характеристиками за відомими рівняннями:

$$\sum B_{\text{тех}} = B_{\text{тех}}^{\text{Q}} + B_{\text{тех}}^{\text{ел}}; \quad (26)$$

$$B_{\text{тех}}^{\text{Q}} = \frac{Q_{\text{тех}}}{Q_{\text{н}} \eta_{\text{ТЕЦ}}^{\text{Q}}}; \quad (27)$$

$$B_{\text{тех}}^{\text{ел}} = \frac{E_{\text{тех}}^{\text{ел}}}{Q_{\text{н}} \eta_{\text{ТЕЦ}}^{\text{ел}}}, \quad (28)$$

де $\eta_{\text{ТЕЦ}}^{\text{Q}}$ та $\eta_{\text{ТЕЦ}}^{\text{ел}}$ – ККД ТЕЦ на вироблену теплоту й електричну енергію, відповідно.

Проаналізуємо енергетичні перетворення з точки зору другого закону термодинаміки. Так, виведена в ТЕЦ із стану термодинамічної рівноваги хімічна (вільна) енергія палива на шляху до рівноваги з НС проходить через термодинамічну систему ТТК (рис. 5), у якій через послідовність необоротних процесів відбувається повне спрацювання корисних потенціалів. Оскільки потенціали спрацьовані, така енергія втрачає сенс, а тому поновлюється високопотенційною за рахунок палива. Важливо те, що метод енергетичних балансів при цьому не фіксує жодних змін – кількість енергії на вході в ТТК і на виході однакова. Як відомо, на практиці цей парадокс корегується введенням двох антропоморфних понять: «корисно використана енергія» та «втрати», жодне з яких не відповідає змісту закону збереження енергії. Таким чином, в енергетичному підході аналізуємо наслідки, залишаючи поза увагою причини. Натомість, якщо в основу аналізу ефективності покласти принцип «енергетичної компенсації необоротності», то отримаємо прямий зв'язок: *паливо (енергія) – необоротність – ефективність*.

Загальне зростання ентропії, що визначається із рівняння ЗАБ (8), запишемо як суму двох доданків:

$$\sum \Delta S_{\text{irrev}}^{\text{tot}} = \sum \Delta S_{\text{irrev}}^{\text{Q}} + \sum \Delta S_{\text{irrev}}^{\text{ел}}. \quad (29)$$

Перший доданок характеризує необоротну взаємодію теплоти з НС:

$$\sum \Delta S_{\text{irrev}}^{\text{Q}} = Q_{\text{тех}} \left(\frac{T_s - T_0}{T_s T_0} \right), \quad (30)$$

де T_s – температура насичення пари на вході в ТТК.

Другий – дисипацію електричної енергії з подальшою тепловіддачею теж до НС:

$$\sum \Delta S_{\text{irrev}}^{\text{ел}} = \frac{E_{\text{тех}}^{\text{ел}}}{T_0}. \quad (31)$$

Далі підставимо рівняння (30) та (31) у (27) та (28), відповідно. Утвореним постійним комплексам присвоїмо нові змінні:

– питома витрата палива на компенсацію необоротності від теплової взаємодії:

$$b_T = \frac{T_s T_0}{(T_s - T_0) Q_n^p \eta_{TECH}^Q}; \quad (32)$$

– питома витрата палива на компенсацію необоротності від дисипації електричної енергії:

$$b_D = \frac{T_0}{Q_n^p \eta_{TECH}^{ел}}. \quad (33)$$

У результаті отримаємо співвідношення для розрахунку витрат палива на компенсацію загальних необоротностей теплотехнологічних процесів на основі енергетичного (так званого «фізичного») та ентропійного підходів:

$$B_{тех}^Q = \sum \Delta S_{irrev}^Q b_T; \quad (34)$$

$$B_{тех}^{ел} = \sum \Delta S_{irrev}^{ел} b_D. \quad (35)$$

Зважаючи на зміст попередніх рівнянь та на адитивність ентропії, зробимо висновок: *будь-яка термодинамічна система, у якій реалізуються необоротні процеси різної природи, є споживачем палива, енергія якого витрачається на компенсацію необоротних змін. Таким чином витрату палива можна подати у вигляді добутку зростання ентропії від необоротності процесів на відповідний коефіцієнт пропорційності:*

$$B_i = \Delta S_{irrev i}^Q b_T + \Delta S_{irrev i}^{ел} b_D, \quad (36)$$

де B_i – витрата палива на компенсацію необоротності процесів в i -й підсистемі ТТК; $\Delta S_{irrev i}^Q$ – зростання ентропії від необоротності теплообміну; $\Delta S_{irrev i}^{ел}$ – зростання ентропії від дисипації упорядкованої форми енергії.

Відтак, загальну витрату палива можемо переписати у наступному вигляді:

$$\sum B_{тех} = \sum_{i=1}^n B_i, \quad (37)$$

де n – кількість підсистем ТТК.

Подібним чином можна встановити зв'язок між витратою палива та внутрішньою та зовнішньою необоротностями ТТК. Для цього необхідно розділити зростання ентропії за джерелами генерації:

$$\sum \Delta S_{irrev}^{in} = \sum_{in} \Delta S_{irrev}^Q + \sum_{in} \Delta S_{irrev}^{ел}, \quad (38)$$

$$\sum \Delta S_{irrev}^{out} = \sum_{out} \Delta S_{irrev}^Q + \sum_{out} \Delta S_{irrev}^{el}. \quad (39)$$

Тоді рівняння витрати палива на компенсацію внутрішньої та зовнішньої необоротностей ТТК набудуть вигляду:

$$B_{tex}^{in} = \sum_{in} \Delta S_{irrev}^Q b_T + \sum_{in} \Delta S_{irrev}^{el} b_D, \quad (40)$$

$$B_{tex}^{out} = \sum_{out} \Delta S_{irrev}^Q b_T + \sum_{out} \Delta S_{irrev}^{el} b_D. \quad (41)$$

Апробація результатів досліджень мала місце як на міжнародних конференціях, так і в промислових умовах на підприємствах України цукрового виробництва.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Розроблена методика термодинамічного аналізу ТТК цукрового виробництва дозволяє аналізувати основні фактори впливу на енергетичну ефективність комплексу безвідносно до перебігу процесів, що реалізуються всередині системи. Використання принципу енергетичної компенсації необоротності та ентропійних критеріїв дозволяють визначити джерела та причини недосконалості систем, а складені рейтинги недосконалостей допомагають розробити систему заходів підвищення ефективності ТТК оптимальної послідовності.

Weaknesses. На даному етапі дослідження відсутній єдиний критерій ефективності, який би комплексно характеризував енергетичну ефективність ТТК цукрового виробництва, що за певних умов може ускладнювати процедуру порівняльного аналізу рівня досконалості існуючих та пропонованих теплових схем.

Opportunities. Запропонована методика термодинамічного аналізу дозволяє наступне:

- розробити систему заходів підвищення енергетичної ефективності на відповідних етапах реконструкції цукрових підприємств;
- за умови ідеалізації реальних процесів визначити їх мінімально можливу необоротність та мінімально можливу витрату палива на технологічний процес бурякоцукрового виробництва, що будуть основою для розробки комплексного критерію енергетичної ефективності ТТК цукрового виробництва.

Threats. Досягнення найкращих показників енергетичної ефективності на підприємствах цукрової промисловості можливе за умови комплексного вирішення цього питання. Для цього потрібна стала послідовна законодавча та економічна політика держави у сфері «енергозбереження» й охорони навколишнього середовища не менш важлива, а ніж науково-методологічні засади енергетичного аналізу та оптимізації.

8. Висновки

1. Розроблено загальнопромислові матеріальні, енергетичні та ентропійні баланси ТТК цукрового виробництва, які є основою методики термодинамічного аналізу комплексу як єдиної термодинамічної системи.

Такий підхід дозволяє швидко проаналізувати основні фактори впливу на енергетичну ефективність комплексу безвідносно до перебігу процесів, що реалізуються всередині системи.

2. Розроблено методику побудови рейтингів недосконалості підсистем ТТК на основі ентропійних характеристик. Для максимальної локалізації необоротностей запропоновано три групи рейтингів: «внутрішня піраміда недосконалості», «зовнішня піраміда недосконалості» та «загальна піраміда недосконалості».

3. Встановлено кількісний взаємозв'язок між необоротністю процесів і енергетичною ефективністю ТТК через твердження, що *будь-яка термодинамічна система, у якій реалізуються необоротні процеси різної природи, є споживачем палива, енергія якого витрачається на компенсацію необоротних змін.* Таким чином, витрату палива можна подати у вигляді добутку зростання ентропії від необоротності процесів на відповідний коефіцієнт пропорційності: $B_i = \Delta S_{irrevi}^o b_T + \Delta S_{irrevi}^{en} b_D$.

Література

1. 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: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.007>
2. Borsukiewicz-Gozdur, A. (2013). Exergy analysis for maximizing power of organic Rankine cycle power plant driven by open type energy source. *Energy*, 62, 73–81. doi: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.096>
3. Liao, G., E, J., Zhang, F., Chen, J., Leng, E. (2020). Advanced exergy analysis for Organic Rankine Cycle-based layout to recover waste heat of flue gas. *Applied Energy*, 266, 114891. doi: <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114891>
4. Karellas, S., Braimakis, K. (2016). Energy–exergy analysis and economic investigation of a cogeneration and trigeneration ORC–VCC hybrid system utilizing biomass fuel and solar power. *Energy Conversion and Management*, 107, 103–113. doi: <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.080>
5. Kamate, S. C., Gangavati, P. B. (2009). Exergy analysis of cogeneration power plants in sugar industries. *Applied Thermal Engineering*, 29 (5-6), 1187–1194. doi: <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.06.016>
6. Taner, T., Sivrioglu, M. (2015). Energy–exergy analysis and optimisation of a model sugar factory in Turkey. *Energy*, 93, 641–654. doi: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.007>
7. Taner, T., Sivrioglu, M. (2015). Data on energy, exergy analysis and optimisation for a sugar factory. *Data in Brief*, 5, 408–410. doi: <http://doi.org/10.1016/j.dib.2015.09.028>
8. Dogbe, E. S., Mandegari, M. A., Görgens, J. F. (2018). Exergetic diagnosis and performance analysis of a typical sugar mill based on Aspen Plus® simulation of the process. *Energy*, 145, 614–625. doi: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.134>
9. Tekin, T., Bayramoğlu, M. (1998). Exergy Loss Minimization Analysis of Sugar Production Process from Sugar Beet. *Food and Bioproducts Processing*, 76 (3), 149–154. doi: <http://doi.org/10.1205/096030898531963>
10. Albdoor, A. K., Ma, Z., Cooper, P., Ren, H., Al-Ghazzawi, F. (2020).

Thermodynamic analysis and design optimisation of a cross flow air to air membrane enthalpy exchanger. *Energy*, 117691. doi: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117691>

11. Самійленко, С. М., Василенко, С. М., Буляндра, О. Ф., Шгангєєв, К. О., Шутюк, В. В. (2012). Методологічні засади термодинамічного аналізу теплообмінних систем цукрового виробництва. Частина 2. *Наукові праці НУХТ*, 45, 43–52.

The object of research is the heat-technological systems of sugar production and the heat-technological complex as a whole. A modern sugar factory is a complex hierarchical system of inextricably interconnected elements, and its basis – a heat-technological complex – combines the elements of technological, heat transfer, and mechanical equipment, in which complex physicochemical processes are simultaneously realized, closely interacting. Given the complexity of the internal relationships of processes, their parameters and characteristics, it is necessary to systematically approach the analysis of real functioning, performance evaluation and the solution of optimization problems of the complex as a whole, as well as its individual subsystems and elements.

In this work, it is proposed a method for thermodynamic analysis of the heat-technological complex of sugar production as a single thermodynamic system, which allows to analyze the main factors influencing the energy efficiency of the complex regardless of the course of processes implemented within the system. The methodology is based on a joint analysis of the general synthetic and analytical balances of mass, energy and entropy. This model has a deep physical foundation, because the material balance equation is an integral form of the law of conservation of the quantity of matter, the energy balance equation is an integral form of the first law of thermodynamics, and the entropy balance equation is an integral form of the second law of thermodynamics. The main objective of the methodology is a quick assessment of the excellence of the heat-technological complex and its definition of «energy-saving potential». Also, the application of the principle of energy compensation of irreversibility and entropy criteria allows to determine the sources and causes of system imperfections, and imperfections are compiled to help develop a system of measures to increase the efficiency of the optimal sequence complex. Therefore, the proposed methodology of thermodynamic analysis, in contrast to the methods based on exergy characteristics, provides a comprehensive analysis, operating only with the fundamental laws and principles of classical thermodynamics. It can also be used both to optimize the energy characteristics of existing ones and to design new sugar industry enterprises.

Keywords: *energy efficiency, irreversibility of processes, thermodynamic analysis, entropy method, resource-saving measures.*