

Волошин В. С., д-р техн. наук, проф.;

Бурко В. А., канд. техн. наук, доц

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь - Дніпро, Україна

ОЦІНКА ЯКОСТІ ДОДАТКОВОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ МЕХАНІЗМАМИ МІНІМІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

Відомо, що теплова енергія є кінцевим енергетичним відходом для будь-якого технологічного процесу. Це відхід, кількість якого майже необмежена в масштабах економік світу, а здатність її утилізувати невеличка. Одним з можливих способів мінімізації цього специфічного відходу є використання якісної первинної енергії в технологічному процесі.

Якість енергії визначається її здатністю виконувати корисну роботу з мінімальними втратами, що пов'язано з термодинамічними характеристиками, такі як ексергія (доступна робота) та ентропія (міра розсіювання). Методи оцінки якості енергії, її здатності до перетворення в інші види стає подалі все актуальною проблемою, якщо враховувати всі теплові відходи, що супроводжують велику кількість існуючих технологічних процесів. Адже, на кожну одну кВт·год використаної енергії людина залишає Природі не менш 0,45÷0,5 кВт·год найменш якісної теплової енергії. Для світової економіки це втрати, що вимірюються тисячами гігаджоулей створеної колись енергії – електричної, механічної, ядерної, хімічної.

Загалом для оцінки якості енергії, яка використовується в технологічних процесах, можна спиратися на коефіцієнт якості (μ) — це відношення ексергії до повної енергії (A_x/E_w) виражене у частках (0÷1). Чим вище μ , тим якісніша енергія. Очевидним показником якості є й сама ексергія системи (A_x), яка виражає максимальну корисну роботу, що видобувається з енергії відносно температури навколишнього середовища $A_x = H - T_0\Delta S$ де: H — ентальпія (тут повна енергія), T_0 - температура навколишнього середовища (зазвичай 298 K), ΔS - зміна ентропії.

При відносно величезній кількості технологічних процесів, вигаданих людиною, у них використовується обмежена кількість видів енергії. Зведені дані про типові види енергії, які найчастіше використовуються в технологічних процесах, а також деякі їх термодинамічні характеристики наведені в таблиці 1. Види енергії представлені в

порядку зменшення їхньої якості. Найбільш якісною енергією, яка часто використовується в технологічних процесах, є електрична ($\mu \approx 1$), тому що вона майже без теплових втрат перетворюється на ексергію. Найменш якісною вважається низькотемпературне тепло $\mu \approx 0,05 \div 0,1$ через високу ентропію та низьку здатність до виконання роботи. Наприклад, для механічної енергії втрати незначні і пов'язані тільки з тертям в системі, а для хімічної енергії з високою ексергією, частина енергії втрачається з теплом, що виділяється при реакціях

Таблиця 1 – Деякі характеристики видів та джерел енергії, що застосовуються в технологічних процесах у міру зменшення їх енергетичної ефективності (за даними робіт [1, 2, 3, 4, 5]).

Вид енергії	Коефіцієнт якості (μ)	ΔS , Дж/К (діапазон)	A_x , кДж/кг	Термодинамічні показники
Електрична	1.0	0÷10	3600	$H = 3600$
Механічна	0.95	20÷100	950	$H = 1000$
Пружина я	0,92	50÷150	920	
Хімічна	0.85	4000÷6000	34000	$H = 40000$
Електромагнітна	0,92	250÷550	2952	
Ядерна	0.80	5000÷8000	$8 \cdot 10^7$	$H = 10^8$
Високотемпературне тепло	0.60	1500÷2500	1800	$H = 3000, T = 1200K$
Середньотемпературне тепло	0.30	3500÷4500	600	$H = 2000, T = 500K$
Електростатична	0,25	1000÷2000	250	
Магнітостатична	0,20	1500÷2500	200	
Низькотемпературне тепло	0.10	5500÷7000	100	$H = 1000 T = 310K$

Розрахунки термодинамічних показників дуже прості, але дають повне уявлення про властивості енергії, які потрібні при оцінці її якості за критерієм «корисна робота». Зокрема:

-для електричної енергії (прийемо за константу $H = 3600$ кДж/кг - еквівалент 1 кВт·год на 1 кг умовної маси. Тоді $\Delta S = 0$ (умовно не має теплових втрат), а $A_x = 3600 - 298 \cdot 0 = 3600$ кДж/кг;

-для механічної енергії та $H = 1000$ кДж/кг (наприклад, кінетична енергія), запишемо $\Delta S = 0,05$ кДж/(кг · К) (тертя), а $A_x = 1000 - 298 \cdot 0,05 = 985$ кДж/кг;

-для хімічної енергії, наприклад, $H = 40000$ кДж/кг (теплота згоряння бензину), $\Delta S = 5,0$ кДж/(кг · К) і $A_x = 40.000 - 298 \cdot 5,0 = 38510$ кДж/кг;

-для електромагнітної енергії також приймаємо $H = 3600$ Дж/кг і $\Delta S = 0,4$ кДж/(кг·К), тоді $A_x = 3600 - 298 \cdot 0,4 = 3480$ кДж/кг, тощо.

Для оцінки якості енергії можна використовувати і кілька інші критерії і залежно від особливостей технологічного процесу, наприклад:

- доступність - ступінь легкості отримання та використання енергії;
- екологічна чистота - рівень впливу на навколишню середу;
- стабільність та надійність поставки - можливість постійного та безперервного забезпечення енергією;
- вартість - витрати на виробництво і доставку енергії.

Подача якісної енергії в певній її кількості є невід'ємною частиною механізмів подолання принципу термодинамічної двоєдності, як причини створення будь-якого виду промислових відходів [1, 2]. Роль і значення якості такої енергії, через ексергетичні механізми впливу на сировину, у будь-якому технологічному процесі неймовірно висока, а її забезпечення є найбільш впливовим аргументом для процесів мінімізації відходів в джерелі їх виникнення – технологічному процесі.

Ми звернемо увагу на такі модифікації існуючих видів енергії, які можуть застосовуватися в технологічних процесах, залежно від їх особливостей, наприклад, енергія постійного знаку, що подається, енергія зворотного знаку, знакозмінна (включаючи синусоїдальну залежність), високочастотна, імпульсна енергія та енергія резонансних частот.

Для оцінки якості таких видів енергії, можна використовувати той же підхід, що і раніше (таблиця 2). Якість визначається через коефіцієнт μ як відношення ексергії (E_x) до повної енергії (E_w), з урахуванням термодинамічних показників (ентропії та негентропії) або ставленням корисної роботи в системі). Види енергії є формами передачі або перетворення, а не самостійними джерелами, тому їх вплив на якість раніше розглянутих видів енергії (наприклад, електричної, механічної) залежить від ефективності перетворення та втрат.

Таблиця 2. – Деякі модифікації енергії, здатні змінити її якість та термодинамічні характеристики (за даними робіт [3, 4, 5, 6])

Вид енергії	Коефіцієнт якості (μ)	ΔS , Дж/К (діапазон)	A_x , кДж/кг	Термодинамічні показники
Постійного знаку	0.98	10÷50	3528	(ΔS мінімальна), H = 3600
Зворотного знаку	0.90	100÷300	3240	(ΔS від перемикачів), H = 3600
Знакозмінна (синусоїдальна)	0.85	200÷500	3060	(ΔS від нагріву), H = 3600
Високочастотна	0.80	300÷600	2880	(ΔS від розсіювання), H = 3600

Імпульсна	0.75	400÷800	2700	(ΔS від переходів), H = 3600
Резонансних частот	0.9 8	20÷100	3420	(ΔS вкрай невелика), H = 3600

Розглянемо деякі результати оцінки якості запропонованих модифікацій енергії.

1. *Енергія постійного знаку.* Постійний струм або механічне рух в одному напрямі - це мінімальні втрати на коливання.

2. *Подається енергія зворотного знаку.* Енергія зі зміною напрямків (наприклад, зворотний струм), це додаткові втрати пов'язані тільки з перемиканням.

3. *Знакозмінна енергія* (синусоїдальна). Змінний струм або коливання пов'язані з появою втрат на нагрівання та індукцію, але при цьому зменшуються втрати у генерації.

4. *Високочастотна енергія.* Електромагнітні хвилі високою частоти дають високу ефективність при точечному застосуванні, але з'являються втрати на розсіювання.

5. *Імпульсна енергія.* Короткі імпульси енергії, це, перш за все, висока ексергія, але можливі втрати пов'язані з перехідними процесами.

6. *Енергія резонансних коливань.* Енергія, синхронізована з резонансними частотами в самої системі, це, як правило, максимальна ефективність при мінімальних втратах.

Розглянемо вплив якості типових видів енергії в технологічному процесі на ефективність виконання необхідних дій, пов'язаних, наприклад, з виникненням термодинамічних сил, здатних цілеспрямовано змінити стан матеріальних потоків, які раніше в технологічних процесах прямували у відходи. Критерії якості: A_x - ексергія системи, μ - коефіцієнт якості енергії.

Припустимо, для базової електричної енергії H = 3600 кДж/кг (еквівалент електричної енергії, зазначений вище). Тоді

Модифікація енергією постійного знаку: $\Delta S = 0,03 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. $\Delta S_{\text{ср}} = 30 \text{ Дж}/\text{К}$

$$A_x = 3600 - 298 \cdot 0,03 = 3591 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \mu = 0,96.$$

Модифікація енергією зворотнього знаку. $\Delta S = 0,2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ $\Delta S_{\text{ср}} =$

200 Дж/К

$$A_x = 3600 - 298 \cdot 0,2 = 3540 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \mu = 0,90.$$

Модифікація з змінною енергією. $\Delta S = 0,35 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$. $\Delta S_{\text{ср}} = 350 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$

$$A_x = 3600 - 298 \cdot 0,35 = 3495 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \mu = 0,85.$$

Високочастотна енергія. $\Delta S = 0,45 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}). \Delta S_{\text{ср}} = 450 \text{ Дж}/\text{К}$

$$A_x = 3600 - 298 \cdot 0,45 = 3465 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \mu = 0,80.$$

Імпульсна енергія. $\Delta S = 0,60 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}). \Delta S_{\text{ср}} = 600 \text{ Дж}/\text{К}$

$$A_x = 3600 - 298 \cdot 0,60 = 3421 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \mu = 0,75.$$

Енергія резонансних коливань. $\Delta S = 0,06 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \Delta S_{\text{ср}} = 60 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$

$$A_x = 3600 - 298 \cdot 0,06 = 3582 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \mu = 0,98.$$

Для інших видів енергії така лінійка результатів буде іншою.

Вплив на якість деяких із раніше розглянутих видів енергії

Електрична енергія. Постійний знак ($\mu \rightarrow 0,96$), резонанс ($\mu \rightarrow 0,98$) покращують якість електричної енергії, височастотна складова ($\mu \rightarrow 0,80$), а також імпульсна ($\mu \rightarrow 0,75$) знижують її якість.

Хімічна енергія. Височастотна енергія та енергія резонансного впливу можуть оптимізувати згоряння або нагрівання, піднімаючи μ на 5-10%.

Теплова енергія. Резонансний вплив на основне джерело енергії в системі сприяє зниженню ΔS , покращує μ на 10 -1 5 %.

Тепер відзначимо наступну важливу особливість, що відноситься до якості енергетики відходоутворення. Незважаючи на те, що в цілому підвищена складність технологій вимагає більше якісної енергії та більшої кількості її видів, майже 85 % поширених технологічних процесів, внаслідок яких отримують 80 % світовий валовий продукції, засновані на механічному та тепловому впливах на сировинні матеріали або це їхні комбінації. Ще частина технологій включає виробництва, в яких використовується хімічна енергія перетворень. При цьому як підведеною енергії використовується, головним чином, електрична енергія та енергія згоряння органічного палива, причому для отримання першою також витрачається енергія горіння органічних речовин. Тому з всіх можливих перетворень енергії у виробничих системах нас може цікавити тільки невелика їх частина, а саме, перетворення

- електричної енергії в механічну та теплову;
- теплову енергію в механічну;
- механічної в теплову.

У певній мірі це відноситься і до електрохімічних, магнітоелектричних перетворень, які мають місце, але в значно менших масштабах, характерних для енерговиробничих та спеціальних енергоперетворювальних систем.

Істотним фактором, що визначає процеси відходоутворення, є способи перетворення та використання енергії в технічній системі. Іншими словами, мова тут може йти про рівень розвитку технічної системи - показник, який хоч і не є визначальним для якості використовуваної енергії, але надає суттєве вплив на процеси відходоутворення. Найпростішим прикладом, що доводить це, є динаміка розвитку теплових машин – парових, поршневих, турбінних, реактивних, інерційних, а також відповідні умови перетворення енергії, що сприяють зниження ентропії у цих системах.

Продовжуючи наші міркування, звернемося до схеми взаємних часткових перетворень різних видів найчастіше зустрічаються видів енергії, поданої на роботах Г.А. Алексєєва (табл. 3).

Таблиця 3 – Особливості взаємних перетворень різних видів енергії

№	Вид енергії	1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Механічна		+	⊕	+	+	⊕	+	+
2.	Пружна	⊕		⊕	-	-	+	-	-
3.	Теплова	⊕	+		+	+	⊕	+	+
4.	Хімічна	+	-	⊕		-	+	-	+
5.	Електростати – чеська	+	-	-	-		+	-	+
6.	Електродинами – чеська	⊕	-	⊕	+	+		+	⊕
7.	Магнітостати – чеська	+	-	-	-	-	-		+
8.	Електромагнітна	+	-	+	-	-	⊕	-	

*) ⊕- Перетворення енергії, що мають практичне застосування;

+ – можливе безпосереднє перетворення;

- – відсутність перетворення.

Звернемо увагу на те, що у перетвореннях енергії, спрямованих на збільшення її якості, потенційно може брати участь 75% всіх способів перетворення, в той час як із пониженням якості енергії працює лише 25% перетворювачів. Кожен другий вид перетворення є двостороннім та взаємоподібним. Однак на практиці для

взаємоперетворень використовується тільки кожен п'ятий спосіб перетворення енергії. І далеко не завжди вони спрямовані на використання якісної енергії.

Загальний алгоритм аналізу якості енергії, яка потрібна на управління процесами мінімізації відходів у межах технологічного процесу надано на рис. 1.

Пошук необхідного додаткового джерела енергії починається з визначення базового типу енергії, згідно з алгоритмом, та аналізу можливих її модифікацій (I -й крок алгоритму). У розпорядженні знаходиться 11 найчастіше застосовуваних видів енергії та шість розглянутих вище найбільш типових модифікацій, всього теоретично можливих 66 варіантів для використання додаткової енергії, за якістю відповідних головною умовою – зміні стану термодинамічної рівноваги для тієї частини сировини, яка у звичайних умовах перетворюється на відхід.

Відношенням, узгодженим за якістю з існуючим у технологічному процесі джерелом енергії приймемо умову, однакову для всіх видів енергії та їх модифікацій, а саме, $\Delta S_i < \Delta S_{min}$ і $\mu_i \rightarrow \mu_{max}$, маючи на увазі під значенням ΔS_{min} мінімально можливу розрахункову зміну ентропії в технологічному процесі, а під μ_{max} - максимально можливу термодинамічну ефективність, орієнтовану на найбільш якісну енергію.

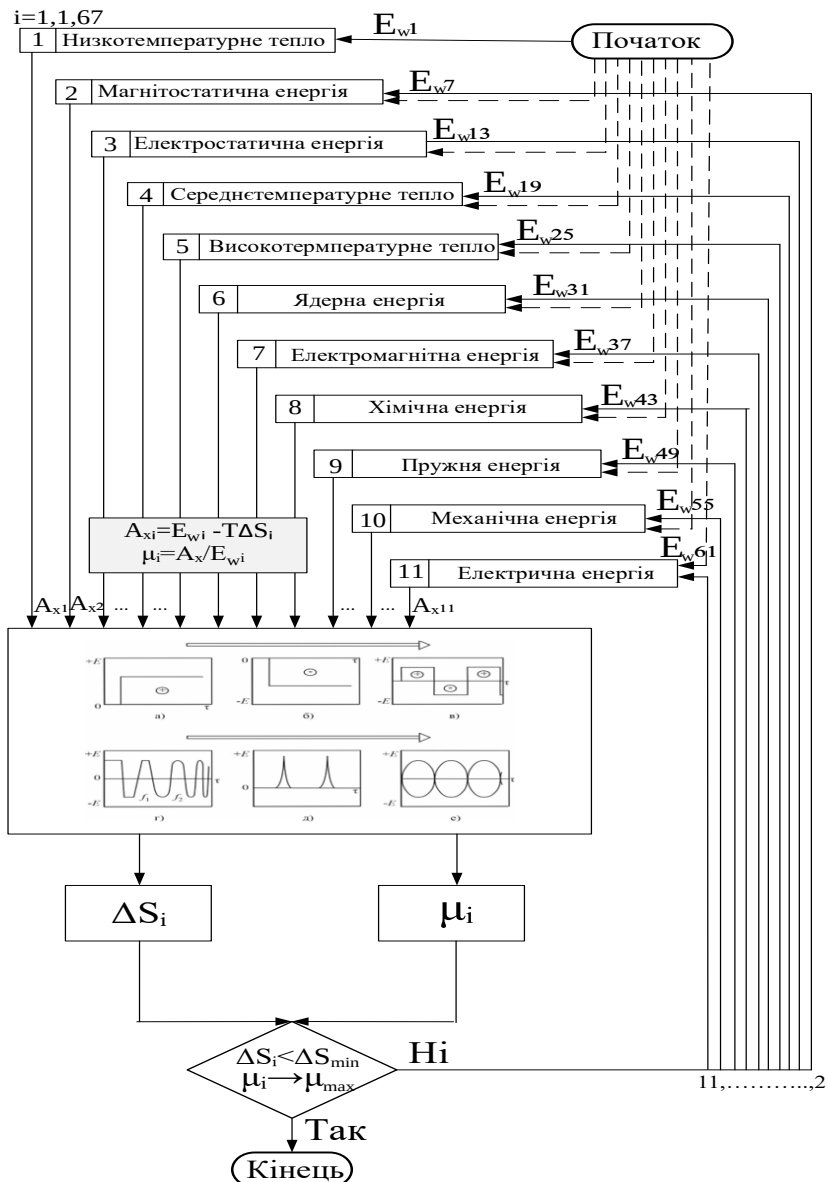


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму пошуку якісної енергії, здатної до цільового управління матеріальними потоками відходоутворення у технологічному процесі.

Безумовно, далеко не всяка енергія за своєю якістю здатна до виконання такої задачі. І докладний перебір варіантів, згідно з алгоритмом, це тільки перша частина такого аналізу. за умовами конкретного технологічного процесу. За властивостями сировини, термодинамічних параметрів, тривалості процесу можна підібрати необхідне джерело енергії.

Висновок

Якість енергії, що використовується в будь-якому технологічному процесі є суттєвим фактором, що впливає на процеси відходоутворення не тільки матеріальної його частини, але і з енергетичної. Вимоги до якості додаткової енергії, що вводиться в технологічний процес, це друга умова, необхідна подолання принципу термодинамічного двоєдності з метою мінімізації відходів в межах самого технологічного процесу, забезпечуючи умови національного законодавства про поводження з відходами.

Література

1. Волошин В. С. Відходи та їх природа. СПД Самченко, Київ-Маріуполь, 2024. 630 с
2. Волошин В. С. Відходи та термодинаміка. СПД Самченко, Київ-Маріуполь, 2024. 80 с.
3. Moran M.J., Shapiro H.N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 8th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2014. 1040 p.
4. Cengel Y.A., Boles M.A. Thermodynamics: An Engineering Approach. 9th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019. 1008 p.
5. Bejan A. Advanced Engineering Thermodynamics. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2016. 792 p.
6. Dincer I., Rosen M.A. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. 576 p.