

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

УДК 621.103

П.П. Куделя, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-4941-5795
Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
С.В. Дубовський, д-р. техн. наук, ст. наук. співр., ORCID 0000-0001-9418-2092
Інститут технічної теплофізики НАН України

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ І ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХОДИ ДО ПРОБЛЕМИ РАЦІОНАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ

Роботу присвячено двом методам аналізу енергоперетворюючих процесів – енергетичному та ексергетичному і ролі в них термодинамічних характеристик – кількості (стала величина) та якості (змінна властивість). Основної уваги приділено ексергетичному методу і якійсь характеристикі енергії, розумінню її фізичного смислу, встановленню зв'язку якості енергії з положеннями Другого закону термодинаміки, які відповідають сучасному рівню термодинамічної науки, описові універсальної міри якості різних форм енергії – ексергії і її значення для вирішення задач раціонального використання енергії. Дана робота може бути корисною для тих, хто зацікавлений в кращому розумінні положень Другого закону, основ ексергетичного методу і в його практичному застосуванні.

Ключові слова: енергозбереження, Перший закон, Другий закон аналіз за другим законом термодинаміки, якість енергії, ексергія, дисипація, виробництво ентропії.

Вступ

Немає потреби доводити, що зменшення споживання енергії є одним із найважливіших завдань людства. Вирішення його має на меті збереження непоновлюваних енергоресурсів (первинних енергетичних ресурсів (ПЕР), викопних палив) і скорочення шкідливих викидів в атмосферу. Минули безповоротно ті часи, коли люди використовували природу як невичерпний склад, звідки дозволено брати все, що заманеться, і в той же час як величезне звалище, куди можна викидати все, що не потрібно. Енергозбереження прямо пов'язане з подальшим сталим розвитком суспільства (СРС), тобто з розвитком, який задовольняє сучасним вимогам, але при цьому не ставить під загрозу можливість майбутніх поколінь задовольняти свої потреби. Проблема раціонального використання первинної енергії загострюється сьогодні у зв'язку з нагальною необхідністю попередження катастрофічних наслідків глобальних змін клімату, найбільш вірогідною причиною якого є викиди парникових газів з продуктами згоряння викопного палива.

Для успішного проведення активної енергозберігаючої політики суттєво важливий науково обґрунтований аналіз всієї послідовності енергетичних процесів. Базою для такого аналізу служить сучасна термодинамічна наука про енергію і її перетворення. Закони термодинаміки в стислій формі включають в себе величезний досвід людства по вивченню властивостей енергії в процесах її перетворень.

На сьогодні переважають два підходи до ефективного використання енергії: енергетичний та ексергетичний [1-4]. Енергетичний підхід ґрунтується на Першому законі термодинаміки – Законі збереження енергії, ексергетичний – на спільному застосуванні двох основних законів термодинаміки – Першого і Другого до технічних задач. Такі підходи пов'язані з використанням двох термодинамічних характеристик енергії – кількості і якості: кількості – в енергетичному, обох – в ексергетичному [2, 5-8].

За Першим законом можливі лише перетворення одних форм енергії в інші з додержанням балансу кількості енергії. Розвиток науки і техніки змусив прийняти до уваги той факт, що врахування лише кількісної характеристики енергії необхідно, але недостатньо для вирішення проблем енергетики. Виникла потреба врахувати важливу для практики характеристику енергії – якість. Як буде показано далі, основна якісна характеристика енергії – це здатність її до перетворення в інші форми, що в свою чергу визначає придатність, економічну цінність енергії. Таку здатність відображає Другий закон, який встановлює умови перетворення енергії і являє собою по суті закон перетворення енергії.

© П.П. Куделя, С.В. Дубовський, 2020

Відмітимо, що Другий закон має фундаментальне значення. Без використання Другого закону подальший розвиток теплоенергетики, хімічної технології і багатьох інших галузей техніки і науки був би неможливий. Важливість Другого закону підкреслюється і відомим афоризмом: Перший закон у термодинаміці виконує обов'язки головного бухгалтера, Другий – директора. Це вірно в тому розумінні, що не тільки напрям усіх реальних процесів, а і можливість їх протікання визначає саме Другий закон, а Перший лише пильнує за тим, щоб зберігався баланс енергії.

Для визначення якості енергії в кількісній формі, іншими словами, для встановлення стандарту, кількісної міри якості енергії знадобилось рівняння не лише Другого закону – ентропійний баланс, а і Першого – енергетичний баланс. В результаті їх спільного рішення було одержано універсальну міру якості, яка отримала назву «ексергія» і врахувала як якісну характеристику енергії, так і кількісну. На понятті «ексергія» ґрунтується ексергетичний баланс і ексергетичний метод аналізу енергоперетворюючих процесів. Таким чином, ексергетичний аналіз являє собою застосування основних законів термодинаміки до технічних систем. Метод направлений на рішення задач найбільш ефективного використання енергоресурсів. Основи цього методу закладено в 50-х роках минулого століття в основному вченими Польщі, Росії, Германії. В США широке використання ексергетичного методу почалось після енергетичної кризи 1970-х років і особливо після дискусії в 1980 році в журналі «Energy». Всі застосування ексергетичного методу спираються на той незаперечний факт, що в енергоперетворюючих процесах енергія водночас і зберігається кількісно (Перший закон) і деградує, знижуючи свою якість – ексергію (Другий закон). Суть проблеми енергозбереження якраз і полягає в тому, щоб навчитись економно розпоряджатись якістю енергії – ексергією. З допомогою ексергетичного аналізу вдається вибирати ексергетично сприятливі процеси, тобто мало споживаючі ексергію і, крім того, уникати втрат ексергії при перетворенні первинної енергії в необхідну кінцеву енергію. На сьогодні ексергетичний метод добре обґрунтований, набув широкого визнання і не потребує доказів корисності. Приклади плідних ідей, ефективних технічних рішень, які вдалось втілити в життя з допомогою ексергетичного методу, а також приклади грубих помилок, яких вдалось би уникнути при використанні ексергетичного аналізу, детально описані в літературі [1-5, 7, 9-12]. Корисні для практики рекомендації, які направлені на зменшення втрат ексергії, а отже і на економію енергоресурсів, можна знайти в роботах [5, 10, 13].

Ексергетичному методу присвячена величезна кількість статей і книг, він вивчається на відповідних технічних спеціальностях в усіх передових навчальних закладах світу. Проте в нашій країні значна частина тих, кому ексергетичний метод може бути корисним в науковій і практичній діяльності (науковці і інженери), мають про нього досить віддалене уявлення. У вітчизняних підручниках термодинаміки ексергетичний метод ще не знайшов достатнього застосування, його наукові і методичні переваги в трактовці фундаментальних положень термодинаміки не використовуються. Діють в основному уявлення, які засновані на чисто енергетичному підході до енергетичних перетворень, в якому враховується лише одна термодинамічна характеристика енергії – кількість. Як приклад, може служити твердження, що основні втрати на теплових електростанціях відносяться до конденсатора, а отже він може бути помилково прийнятий як елемент, головним чином відповідальний за низький коефіцієнт корисної дії станції.

Мета та завдання

В даній роботі основна увага приділена розумінню фізичного смислу поняття «якість енергії», встановленню зв'язку якості енергії з положеннями Другого закону, описові кількісної міри якості енергії – ексергії і її значення для вирішення задач енергетики. Оскільки закономірності зміни якості енергії відображає Другий закон, то для його розуміння і практичного застосування виникла потреба детально опрацювати його на мікроскопічному (статична термодинаміка) і макроскопічному (класична термодинаміка) рівнях з використанням понять «дисипація енергії» і «виробництво ентропії». Дана робота може бути корисною для тих, хто зацікавлений в кращому розумінні положень Другого закону, основ ексергетичного методу і в його практичному застосуванні.

Матеріал та результати досліджень

1. Значення терміну «енергія», термодинамічні характеристики енергії

Для того, щоб з знанням справи користуватись законами термодинаміки і впливаючими з них підходами до ефективного використання енергії, спочатку з'ясуємо, що означає термін «енергія» і які існують важливі для практики її термодинамічні характеристики.

Існування поняття енергії встановлює Перший закон. Частіше всього енергія трактується як узагальнена кількісна міра різних форм руху матерії (тіла і його мікрочастинок – молекул, атомів...). Збереження енергії означає, що при взаємних перетвореннях різних форм руху матерії кількість енергії завжди залишається сталою. Виразити смисл терміна «енергія» через інші, більш зрозумілі терміни, не вдається [14, 15]. Відомий фізик, лауреат Нобелівської премії Р.Фейман та інші стверджують, що фізиці сьогодення невідомо, що таке енергія [14, 15]. В [15] висловлена думка, що можливо енергія, як і поезія, така реальність, яку краще зовсім не визначати: ми звикаємо до терміна «енергія» в процесі успішного його використання в усіх сферах людської діяльності. Оскільки дати точне визначення терміна «енергія» не вдається, то в [14] була запропонована обґрунтована методика виявлення значення терміна.

Суть її полягає в тому, що з різних загальнонаукових і технічних дисциплін беруться ті значення, в яких прийнято використовувати певний термін. З аналізу численних джерел, не дивлячись на деякі протиріччя висловлювань, можна встановити, що переважають такі значення терміну «енергія»: фізична величина і рух (чи форма руху) матерії [14].

Оскільки енергія входить в багато формул, які зв'язують фізичні величини, то, очевидно, вона також відноситься до категорії фізичних величин. По суті від них не відрізняються міркування, в яких використовується термін «міра» як синонім терміна «фізична величина» [14].

В багатьох випадках термін «енергія» використовують в якості синоніма терміна «рух» або «форма руху» матерії. Наприклад: електрична, теплова, механічна, хімічна, ядерна енергії, дисипація (розсіювання) енергії. Твердження, що енергія - властивість матерії справедливе, якщо під енергією розуміти рух – атрибут (невід'ємна властивість) матерії. Широко поширений термін «Закон збереження і перетворення енергії»: у поєднанні зі словом «збереження» енергія означає фізичну величину, а у поєднанні зі словом перетворення – рух. Рух може змінювати форму (перетворюватись), а фізична величина – ні до яких перетворень не здатна [14].

В залежності від того, в якому значенні використовується термін «енергія» (фізична величина чи рух), в літературі можна зустріти такі вирази: енергія упорядкованого руху і упорядкована енергія, енергія неупорядкованого (хаотичного) руху і неупорядкована (хаотична, теплова) енергія і т.ін. [8, 14, 16]. В сучасній термодинаміці термін «енергія» використовується як в значенні «фізична величина», так (і що важливо) як «рух» чи «форма руху». Такі значення терміну «енергія» приводять до поєднання у ньому двох термодинамічних характеристик енергії: кількості (завжди стала величина) і якості (змінна властивість, пов'язана зі словом «рух»).

2. Кількісна характеристика енергії і Перший закон термодинаміки

Енергетичний баланс є початковим пунктом кожного енергетичного аналізу. В загальному випадку в енергобалансі представляються всі форми енергії, що стосуються техніки, проте лише кількісно оціненими (Перший закон). Контрольну поверхню системи (рис.1) можуть пересікати (підводитись і відводитись) потоки теплоти ΣQ , роботи ΣN , енергії речовини ΣE_p . Остання складається з потоків ентальпії ΣH , кінетичної ΣKE і потенціальної ΣPE енергій [3, 17]. Для стаціонарних поточних систем у відповідності з законом збереження енергії завжди виконується рівність:

$$\Sigma N^{під} + \Sigma Q^{під} + \Sigma E_p^{під} = \Sigma N^{від} + \Sigma Q^{від} + \Sigma E_p^{від} \quad (1)$$

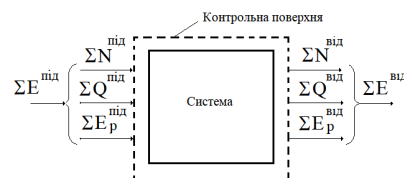


Рисунок 1 - Схема енергетичного балансу системи

Рівняння (1) служить не лише для складання і перевірки енергетичних балансів різних систем, а і для обчислення коефіцієнтів ефективності. Проте енергобаланс не враховує різну якість, технічну цінність форм енергії і зниження енергетичної ефективності реальних процесів внаслідок прояву необоротностей. Тому енергобаланс не може служити надійною основою для складання виразів об'єктивної оцінки досконалості енергоперетворюючих процесів. Після того, як Другий закон був математично оформлений, стало очевидним, що енергетичний баланс будь-якої системи повинен відповідати і його положенням, які стосуються якості різних форм енергії і напряму протікання процесів.

3. Якісна характеристика енергії і Другий закон термодинаміки

У всіх реальних процесах має місце безперервний ланцюг енергетичних перетворень. Як би вони не протікали, в кінцевому підсумку, внаслідок закону збереження енергії природі неминуче віддається стільки енергії, скільки від неї було забрано, але вже в іншій, «відпрацьованій» формі. Отже, значення має не кількість енергії сама по собі, оскільки вона зберігається (Перший закон), а лише природна здатність даної кількості енергії знижувати свою якість в реальних процесах [3, 4, 9, 18]. Подібну думку вперше висловив в середині XIX століття Лауреат Нобелівської премії Р.Шредінгер в книзі «Що таке життя з точки зору фізики», відмітивши, що живий організм має потребу не в енергії, яка міститься в їжі, а в здатності цієї енергії знижувати свою якість.

Визначення терміну «якість енергії». Виникає питання, який характерний критерій може служити основою оцінки якості енергії? Існує лише один загальний критерій якості: в якій мірі властивість будь-чого відповідає своєму призначенню, тобто вимогам споживача, суспільства. Стосовно енергії використання цього критерія у всіх випадках неминуче поєднується з можливістю перетворення енергії з однієї форми в

інші [3, 4, 9, 18]. Саме в здатності енергії до перетворень проявляються розбіжності різних форм енергії, їх якість – практична придатність.

Класифікація форм енергії за здатністю до перетворень

Багаторічні спостереження і дослідження привели вчених до висновку, що за ознакою перетворення різні форми енергії можна розділити на три групи: необмежено перетворювані, обмежено перетворювані і зовсім неперетворювані форми енергії [3, 9]. До енергій, що перетворюються необмежено, належить різного виду роботи, кінетична, потенціальна, електрична, ядерна енергії [3]. Обмежено перетворювана теплота, енергія текучої речовини, що пересікає границю системи - ентальпія. Зовсім не здатна до перетворень і не представляє технічної цінності енергія навколишнього середовища (повітря, морська вода ...). Ця енергія існує лише в фізичному сенсі, а в технічному вона «мертва», до перетворень не здатна, її якість дорівнює нулю (крім випадків, коли існує достатня різниця температур між частинами середовища).

Отже, основна якісна характеристика енергії – це її здатність до перетворення в інші форми. Чому існують обмеження для взаємних перетворень різних форм енергії? Яку практичну роль якість енергії відіграє в аналізі енергоперетворюючих процесів? На ці питання дає відповідь Другий закон термодинаміки. Він відображає, як уже відмічалось, якісні характеристики енергії і по суті являє собою закон перетворення енергії.

Для кращого розуміння Другого закону і його практичного застосування нижче викладено основні положення цього закону, які відрізняються від традиційних і засновані на особливостях перетворення енергії з використанням понять «дисипація енергії» і «виробництво ентропії».

Опис Другого закону на макроскопічному і мікроскопічному рівнях. Основи цього закону закладено у XIX столітті у вигляді принципу необоротності на основі численних макроскопічних дослідних спостережень. Кількісно виразити принцип необоротності вдалося завдяки введенню Клаузіусом в 1865 році поняття ентропії. Ця величина була відкрита суто теоретично як характеристика стану, що з'являється при математичному аналізі ефективності кругових процесів (циклів) і дозволяє в аналітичній формі сформулювати Другий закон термодинаміки. Через таємничий характер, зумовлений головним чином тим, що ентропія не діє на наші органи почуття (не існує приладу, яким її можна виміряти), фізики досить активно протидіяли запровадженню цієї нової величини. Фізичний зміст ентропії було розкрито пізніше у статичній термодинаміці, яка встановлює зв'язок між фізичними властивостями макроскопічного тіла (складається з величезної кількості мікрочастинок - молекул, атомів...) і його внутрішньою мікроскопічною будовою. Австрійський фізик Л.Больцман в кінці XIX віку вперше довів, що фізичну суть ентропії не можна розкрити на відчутному для нас макроскопічному рівні: загадкова характеристика стану – ентропія – відображає невидимий стан мікрочастинок тіла. Л.Больцман ввів статистичне визначення ентропії, як міри неупорядкованості (хаотичності) руху мікрочастинок системи [16, 19]. Це положення означає, що ентропія є зростаючою функцією рівня хаотичності: чим більша неупорядкованість (хаотичність) руху мікрочастинок, тим більше значення ентропії. На підставі теорії ймовірності (статистичний підхід) було доведено, що із всіх форм руху хаотичний (неупорядкований) рух мікрочастинок є найбільш ймовірним. Природно, що будь-який упорядкований рух прагне перейти в хаотичний (неупорядкований) рух (енергію хаосу, безладдя) [8, 16]. Очевидно, що зворотний перехід хаотичного руху мікрочастинок в упорядкований сам по собі (самочинно) здійснюватись не може, бо такий перехід майже неймовірний. Для термодинаміки визначення ентропії, як міри внутрішньої неупорядкованості макротіла чи характеристики ймовірності їх станів, має важливе значення, оскільки воно розкриває фізичний зміст цього поняття і дозволяє робити вірні якісні висновки про основні властивості ентропії та характер її зміни в різних процесах.

На основі опису поведінки мікрочастинок (статистична термодинаміка, мікроскопічний рівень) Другий закон припускає більш просте і фізично ясне тлумачення [8, 16]. Таке обґрунтування Другого закону виходить за рамки класичної термодинаміки (макроскопічний рівень), оскільки спирається на уявлення щодо атомно-молекулярної структури макроскопічних тіл (статистична термодинаміка). Для інженерного аналізу і проектування класична термодинаміка більш корисна ніж статистична. Проте статистична термодинаміка стає більш корисною в поясненні природи досліджуваних явищ. Щоб найбільш природним і фізично зрозумілим шляхом дійти до встановлення закономірностей Другого начала і їх практичного застосування доцільно користуватись положеннями як класичної, так і статистичної термодинаміки.

З позиції перетворюваності енергії суть Другого закону термодинаміки на мікроскопічному рівні визначається таким явищем, яке називається дисипацією (розсіюванням) енергії [16]: **енергія прагне розсіюватися, іншими словами – всі реальні процеси неминуче супроводжуються розсіюванням (дисипацією) енергії; дисипація – явище необоротне.**

Причина цього явища на мікрорівні обумовлена механізмом обміну енергією між величезною кількістю рухомих мікрочастинок при їх взаємних зіткненнях. В результаті енергія хаотичного руху мікрочастинок збільшується (принаймні частина впорядкованого руху переходить в хаотичний, а рівень хаотичності неупорядкованого руху зростає). Ентропія, як міра хаотичного руху мікрочастинок, при цьому виробляється (генерується) $S_{ген} > 0$. Створення ентропії ($S_{ген} > 0$) - найважливіша особливість усіх реальних процесів. Суттєво, що ентропія ($S_{ген} > 0$) виробляється дисипативними процесами всередині системи, а не

запозичується ззовні. Теоретично в ідеальному (оборотному) процесі рівень хаотичності руху мікрочастинок був би незмінним ($S_{ген}=0$), але насправді такий ідеальний процес неможливо реалізувати. Ніякий протилежний процес, тобто процес зі зниженням ентропії ($S_{ген}<0$), неможливий. Дисипація приводить до таких змін енергії, які не піддаються самовідновленню і породжують необоротність перетворення енергії та, як наслідок, необоротність термодинамічних процесів. *Отже, необоротний (реальний) процес – це процес, в якому перетворення енергії відбувається з дисипацією енергії, оборотний – без дисипації.* Природне прагнення енергії до розсіювання визначає і напрям, в якому протікають фізичні і хімічні процеси.

В класичній термодинаміці на макроскопічному рівні Другий закон термодинаміки найбільш загально формулюється так [19, 20]: *про які б системи не йшла мова - ізольовані, закриті, відкриті – завжди виконується нерівність $S_{ген} \geq 0$ ($\delta S_{ген} \geq 0$), тобто вироблена ентропія завжди позитивна, знищення її ($S_{ген} < 0$) неможливе.* Згідно з умовою перетворення енергії $S_{ген} \geq 0$ маємо:

$S_{ген} > 0$ – реальний (необоротний) процес;

$S_{ген} = 0$ – оборотний (гранично ідеалізований);

$S_{ген} < 0$ – неможливий процес.

З опису Другого закону слідує, що відмінність у здатності різних форм енергії до перетворення з мікроскопічних позицій (статистична термодинаміка) пов'язана з різним характером руху мікрочастинок (молекул, атомів ...) [16]. Форми необмежено перетворювальної енергії відрізняються впорядкованим (організованим) характером руху мікрочастинок, а обмежено перетворювані і неперетворювані - невпорядкованим (неорганізованим). По відношенню до ентропії організована енергія (англ. Ordered Energy, нім. Geordnete Energie) безентропійна, характеризується нульовою ентропією ($S=0$). Неорганізована енергія (англ. Disordered Energy, нім. Ungeordnete Energie) – ентропійна, характеризується ентропією відмінною від нуля $S>0$ [3, 4, 6, 8]. У відповідності з умовою перетворення енергії $S_{ген} \geq 0$ всі форми безентропійної енергії ($S=0$) здатні до необмежених перетворень. Навпроти, для ентропійної енергії ($S>0$) неможливе перетворення зі зниженням ентропії ($S_{ген} < 0$). Очевидно, будь-яка організована енергія ($S=0$) в технічному розумінні якісніша, цінніша. Такі форми енергії – універсальні, тому що завжди можливо перетворення їх у будь-яку форму енергії. Якість упорядкованої енергії стовідсоткова. Як буде показано далі, всі необмежено перетворювані форми енергії (безентропійні), повне перетворення яких в будь-яку іншу форму припустиме за Другим законом, можна узагальнити коротким терміном «ексергія». Перетворити повністю неорганізовану енергію ($S>0$) в організовану ($S=0$) неможливо, оскільки при цьому ентропія повинна знижуватись ($S_{ген} < 0$). Часткове перетворення можливе, але лише за умови $S_{ген} \geq 0$.

В процесі дисипації енергії кількість енергії зберігається, але перехід руху в більш хаотичну форму приводить до зниження якості енергії, до її знецінення, деградації в процесах енергетичних перетворень. Здатність енергії до перетворень, її якість погіршується і при відведенні в навколишнє середовище зовсім зникає. Така енергія технічної, економічної цінності не має. Отже, енергія водночас і зберігається (Перший закон) і знижує свою якість – деградує (Другий закон). Наша задача – навчитись економічно розпоряджатись якістю енергії (іншими словами, знижувати рівень виробництва ентропії). В цьому якраз і полягає Суть проблеми енергозбереження [7, 8, 10, 13, 16].

4. Кількісне формулювання Другого закону, ентропійний баланс

Щоб мати можливість виконувати розрахунки, в техніці і природознавстві завжди намагаються виразити закономірності в кількісній формі, тобто у вигляді математичних співвідношень між фізичними величинами. Для Другого закону це вдалось завдяки введенню поняття ентропії. Згідно з кількісним формулюванням Другого закону ентропія може передаватись через контрольну поверхню відкритої системи з теплотою S_Q і речовиною S_p , а також виробляється всередині системи дисипативними процесами ($S_{ген} \geq 0$). Це дозволяє записати рівняння ентропійного балансу для стаціонарного поточного процесу у вигляді (рис. 2) [17, 20, 21]:

$$\Sigma S_p^{під} + \Sigma S_Q^{під} + \Sigma S_{ген} = \Sigma S_p^{від} + \Sigma S_Q^{від}; \quad \Sigma S_{ген} = \Sigma S^{від} - \Sigma S^{під}, \quad \Sigma S_{ген} \geq 0. \quad (2)$$

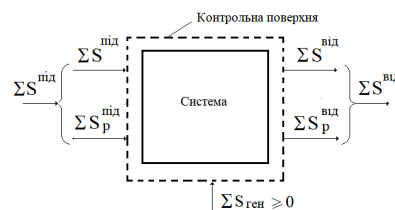


Рисунок 2 - Схема ентропійного балансу системи

Сумарна відведена ентропія $\Sigma S^{від}$ повинна бути рівною сумарній підведеній ентропії або перевищувати її на величину генерації ентропії $\Sigma S_{ген} \geq 0$. Перший випадок відноситься до ідеальної

(оборотної) системи, другий – до реальної (необоротної). Якщо ж $\Sigma S^{\text{від}} < \Sigma S^{\text{під}}$, то $\Sigma S_{\text{ген}} < 0$ – такий процес неможливий.

Ентропійний баланс використовується в ентропійному методі аналізу і оптимізації енергоперетворюючих технічних систем [22, 23]. Проте громіздкість, а в деяких випадках обмежені можливості ентропійного методу не завжди забезпечують знаходження правильних рекомендацій для вирішення інженерних задач [2].

5. Універсальний стандарт якості енергії – ексергія, ексергетичний баланс

Для змінної якості різних форм ентропійної (неупорядкованої) енергії в аналізі технічних систем виникла потреба знайти кількісну міру якості. В принципі мірою якості може бути будь-яка безентропійна (упорядкована) енергія, яку можна одержати від ентропійної (неупорядкованої) енергії. Найбільш природним і зручним стандартом якості виявилась максимальна робота, яку можна одержати з даної форми енергії в умовах даного навколишнього середовища [6]. Цей стандарт якості енергії одержав назву «ексергія». Підкреслимо, що «робота» використовується тільки як загальна міра якості енергії, а не як кінцева мета енергетичних перетворень. Ексергія є цінністю, валютою по відношенню до всіх форм енергії.

Можливість одержати роботу існує лише тоді, коли характеристики системи (тиск, температура, швидкість, хімічний склад і потенційна енергія системи) відрізняються від характеристик стану (параметрів) навколишнього середовища. Ця можливість повністю втрачається, коли система і навколишнє середовище знаходяться в рівновазі та спокої по відношенню один до одного. Звідси навколишнє середовище – нульовий рівень відліку ексергії. Величина роботи, як кількісна міра якості енергії, входить в рівняння енергетичного балансу (Перший закон термодинаміки), а умова перетворюваності $S_{\text{ген}} \geq 0$ - в рівняння ентропійного балансу (Другий закон). Спільне рішення цих рівнянь дозволяє визначити кількісно ексергію різних форм енергії, її втрати в залежності від необоротності процесів (генерації ентропії $S_{\text{ген}} \geq 0$), а також скласти рівняння ексергетичного балансу різних технічних систем перетворення енергії і речовини [17, 24].

Виділення ексергії в складі енергії призвело до думки представити кількість енергії у вигляді двох складових. Одна з них – ексергія, яку можна перетворити в енергію будь-якої форми, а інша – енергія, яка в даних умовах навколишнього середовища ні до яких перетворень не здатна [21]. Для одержання ексергії необхідні цінні природні ресурси – джерела енергії, а по суті джерела ексергії (хімічне і ядерне паливо, гідроенергія і т.ін.), а також спеціальне устаткування. Ексергія в тій чи іншій формі потрібна для реалізації всіх технічних процесів. Тому ексергія завжди має вартість і витратити її слід по можливості економно. На противагу – енергія знаходиться в необмеженій кількості в навколишньому середовищі і її якість дорівнює нулю.

Ексергетичний баланс. Величини ексергетичного балансу включають ексергію тих форм енергії, що входять в рівняння енергетичного балансу. Як правило, це ексергія потоків теплоти E_Q , роботи E_N , речовини E_M [3, 7, 25]:

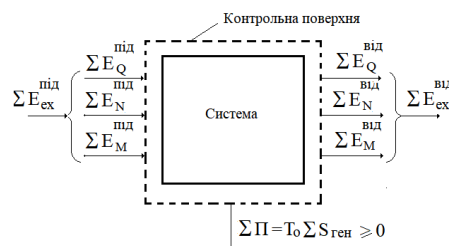


Рисунок 3. - Схема ексергетичного балансу системи

У відповідності з рис.3 для стаціонарної поточної системи рівняння ексергетичного балансу має вигляд [2, 3, 4, 17]:

$$\Sigma E_Q^{\text{під}} + \Sigma E_N^{\text{під}} + \Sigma E_M^{\text{під}} = \Sigma E_Q^{\text{від}} + \Sigma E_N^{\text{від}} + \Sigma E_M^{\text{від}} + \Sigma \Pi. \quad (3)$$

Найбільше практичне значення має ексергія потоку речовини E_M і такі її складові:

$$E_M = E_{\text{физ}} + E_{\text{кін}} + E_{\text{пот}} + E_{\text{хім}},$$

де $E_{\text{физ}}$ – фізична ексергія (ексергія ентальпії), $E_{\text{кін}}$ і $E_{\text{пот}}$ – ексергія кінетичної і потенціальної енергії, $E_{\text{хім}}$ – хімічна енергія - розраховуються за методиками, які приводяться в літературі [3, 6, 7, 10]. Величини $E_{\text{пот}}$, $E_{\text{кін}}$, E_N - це високоякісні, упорядковані (безентропійні) форми енергії і, за означенням, являють собою ексергії ($E_{\text{кін}} = KE$, $E_{\text{пот}} = PE$, $E_N = N$).

Ексергетичний баланс за рівнянням (3) відображує зміст обох законів термодинаміки і, таким чином, враховує не лише якість, а й кількість різних форм енергії. Істотною особливістю ексергетичного балансу є

використання в ньому зіставних, якісно рівноцінних величин – ексергій. Серед складових балансу суттєве місце займає величина $P=T_0S_{gen} \geq 0$, де T_0 – температура навколишнього середовища. Величина P має чітко виражений смисл безповоротних втрат ексергії внаслідок прояву необоротностей (дисипації енергії) в реальних процесах (тертя, теплообмін при кінцевій різниці температур, дроселювання, хімічні перетворення ...). Втрачена (знищена) ексергія перетворюється в анергію - неперетворювану складову енергії - баласт, який підлягає в подальшому відведенню в навколишнє середовище. Перетворити анергію в ексергію за Другим законом ($P=T_0S_{gen} \geq 0$) неможливо. Отже, рівняння ексергетичного балансу може розглядатись як кількісне формулювання закону деградації енергії, тоді як рівняння енергетичного балансу – як кількісне формулювання закону збереження енергії.

Терміни «втрата ексергії» і «втрата енергії» мають принципово різний зміст. Втрата ексергії означає повне її знищення. Втрата енергії означає не втрату взагалі (енергія, як відомо, зникати не може), а втрату її для реалізації даної мети у випадку, коли частина енергії не використовується корисно. Реальний процес може протікати взагалі без втрат енергії, проте внаслідок прояву необоротностей (дисипації енергії) та частина ексергії, яка перетворюється в анергію, і являє собою втрату ексергії. Так, наприклад, адіабатне дроселювання робочого тіла не змінює його енергію, а знижує її якість (ексергію). В адіабатне ізольованих теплообмінниках, вихрових трубах, камерах змішування і згорання енергія повністю зберігається, проте втрачає свою якість, енергетичну цінність, деградує.

6. Ексергетичний метод – основні положення

Необхідно чітко усвідомити, що головне в енергозбереженні з погляду Другого закону – це збереження якості енергії, іншими словами, збереження ексергії, як міри якості енергії, її технічної цінності. Ексергія має вартість і, природно, що її витрати повинні бути економічними. При перетворенні первинних енергоресурсів у необхідну кінцеву енергію важливо знати де, скільки, як і чому ексергія втрачається. Саме ексергетичний метод аналізу (включає складання матеріального, енергетичного і ексергетичного балансів) і вказує на місця, величину і джерела термодинамічної неефективності в енергоперетворюючій системі. Така інформація є необхідною і достатньою для підвищення ефективності технічної системи. Вона недоступна при використанні лише енергетичного аналізу, оскільки в ньому не враховуються якісні характеристики енергетичних потоків. Отже, головна мета ексергетичного аналізу - знаходити і кількісно оцінювати конкретні причини термодинамічної недосконалості теплових і хімічних процесів та виявляти найбільш ефективні способи їх вдосконалення. Аналіз з позиції ексергії можливий на всіх стадіях створення і експлуатації технічних систем. Об'єктами аналізу можуть бути не лише енергетичні системи (наприклад, теплосилові, теплонасосні, холодильні, криогенні установки), а й складні технічні системи перетворення енергії і речовини типу хіміко-технологічних, металургійних, енерготехнологічних. Крім того, ексергетичний метод сприяє розвитку так званого ексергетичного мислення, або в більш широкому плані - мислення на основі положень Другого закону (за американською термінологією Exergy management або Second Law mentality). Коли енергоресурси і технології розглядаються з врахуванням Другого закону через ексергію, то інженерно-енергетичне мислення переходить на більш високий творчий рівень [5,7].

Історія розвитку термодинаміки і її застосування нерозривно зв'язана з показниками ефективності перетворення енергії. Базою для оцінки ефективності слугують рівняння енергетичного і ексергетичного балансів. На цих рівняннях базуються енергетичні і ексергетичні показники ефективності перетворення енергії. Такі показники визначаються як відношення корисного ефекту до затрат на реалізацію цього ефекту. В класичній термодинаміці показники ефективності визначаються лише кількісною оцінкою енергетичних потоків. Як правило, такі безрозмірні показники ефективності в літературі відносились до коефіцієнтів корисної дії (ККД) [2, 4, 26, 27]. Під назвою ККД використовувались різноманітні показники термодинамічної ефективності, в яких зіставляються якісно неоднорідні величини, наприклад, теплота і робота. Ігнорування якісних характеристик енергії приводить до плутанини в ККД в енергетиці і в результаті – до невірних рішень і економічних втрат[2].

Введення поняття ексергії дозволило застосувати для всіх форм енергії єдину якісну характеристику і ввести універсальне визначення ККД як відношення якісно однорідних величин (ексергій). Такі ККД, змінюючись в межах від 0 до 1 (що цілком логічно), показують ступінь наближення до термодинамічно ідеального процесу і називаються ексергетичним ККД (в англійській літературі Exergy Efficiency або Second Law Efficiency). Ексергетичний ККД дозволяє оцінити енергетичну досконалість процесу на основі Першого і Другого законів термодинаміки, врахувати при цьому не лише кількість, а і якість енергії. Це дозволяє зіставляти рівень енергетичної досконалості різних процесів, робити обґрунтований вибір найкращого, визначати принципову можливість і способи удосконалення процесу. Всі коефіцієнти ефективності, в яких якість енергії не враховується, почали називати Coefficient of performance, скорочено COP, дослівно – коефіцієнт виконання, в нашій літературі – коефіцієнт перетворення енергії (КПЕ) [3]. Загальний ексергетичний підхід до визначення ККД не виключає використання COP. Значення COP дає корисну для практики інформацію, показуючи кількісно скільки за даних умов одержується корисної енергії на одиницю затраченої, тобто як система виконує своє призначення. Разом з тим COP, на відміну від ексергетичного ККД, не дає об'єктивну інформацію щодо рівня енергетичної досконалості технічних

систем. Причина в тому, що у визначені COP якість енергії (Другий закон термодинаміки) не береться до уваги і результати невірно відображають рівень досконалості енергоперетворюючих процесів. Так, енергетичний показник ефективності – термічний ККД (КПЕ) геотермальних і атомних станцій, в яких використовується теплота від джерел з відносно низькою температурою, суттєво нижчий, ніж у станцій, які працюють на органічному паливі (при тому ж або більш високому рівні технічної досконалості), тобто цей ККД, на відміну від ексергетичного, дає викривлену інформацію [3, 4, 26, 27]. Енергетичний показник ефективності ідеального вугільно-кисневого паливного елемента (ПЕ) перевищує 120%, а ідеального воднево-кисневого ПЕ чуть вище 80%. Природно, що ексергетичний ККД в обох випадках дорівнює 100% [2].

Результати ексергетичного аналізу дають можливість по-іншому оцінити і вплив процесів в окремих елементах установки на її загальну ефективність. Наприклад, по даним енергетичного аналізу низька ефективність паросилової установки (ПСУ) обумовлена значною кількістю теплоти, яка відводиться в конденсаторі в навколишнє середовище. Ця невикористана теплота складає більше 50% від теплоти, яка виділяється при спалюванні палива. Але її не можна розглядати як суттєву втрату згідно з Другим законом термодинаміки. Доля ексергії в цій теплоті складає всього декілька відсотків (3-5%). Результати енергетичного і ексергетичного аналізів суттєво відрізняються і в оцінці втрат в парогенераторі (ПГ) і в оцінці його ефективності. Так, при енергетичному ККД (КПЕ) котла 0,85-0,9 його ексергетичний ККД, який характеризує досконалість процесів в ПГ, не перевищує 45% [21, 28]. Більше половини ексергії палива втрачається внаслідок необоротності процесів згорання і теплопередачі. Парогенератор, таким чином, являється джерелом великих ексергетичних втрат, що взагалі не знаходить відображення в енергетичному ККД (КПЕ). Тому основна увага при підвищенні енергетичної ефективності ПСУ приділяється заходам, які підвищують ексергетичний ККД ПГ: підвищення початкових параметрів пари, регенеративний підігрів живильної води, повторний перегрів пари і т.ін. [21, 28].

Відмінність між показниками ефективності КПЕ і ексергетичним ККД має фундаментальне значення, оскільки її ігнорування веде до неправильних рішень. Ексергетичний ККД тепер широко використовується в світі як в теоретичних роботах, так і на практиці в енергетиці і в других зв'язаних з нею галузях [3, 4, 6, 7, 11].

Загальний напрямок зниження ексергетичних втрат – це зменшення необоротності процесів (зменшення виробництва ентропії). З такого загального положення витікає багато прийомів зниження втрат ексергії, починаючи з найпростіших методів (таких, як збільшення поверхні теплообмінників) до внесення кардинальних змін в технологію. Так, в одній із хімічних технологій простими засобами вдалось знизити затрати енергії в три рази в порівнянні з класичною технологією [5]. Інформація про необоротності допомагає також зрозуміти ідеї, які лежать в основі дії енергоперетворюючих систем, і тенденції їх розвитку [5, 7].

Таким чином, економія енергоресурсів завжди зводиться в кінцевому рахунку до збереження якості енергії - ексергії, до боротьби проти виробництва ентропії. Наше завдання – навчитись економічно розпоряджатись якістю енергії (ексергією).

Термодинамічно ідеальним є оборотне перетворення енергії без втрат ексергії (якості). Проте практично досягнути його неможливо, оскільки при цьому незмірно зростають затрати на устаткування. В реальних процесах при зменшенні необоротностей (втрат ексергії), з одного боку, досягається економія паливно-енергетичних ресурсів, з іншого – ростуть затрати на устаткування і навпаки. Оскільки зменшення втрат ексергії вимагає, як правило, додаткових інвестиційних затрат, то технічно і економічно найбільш сприятливе рішення допускає певні втрати ексергії, які відповідають мінімальним затратам на устаткування і його експлуатацію. Поєднання економічного аналізу з ексергетичним реалізується у відносно новій і перспективній науці, яка називається термoeкономікою (ексергoeкономікою) [3, 6, 7, 10]. Ексергетичний метод при його правильному використанні надасть суттєву допомогу при вирішенні важливих задач економії енергетичних і матеріальних ресурсів [2, 29].

Висновки

Показано, що значення терміну «енергія» поєднує дві термодинамічні характеристики енергії: кількість і якість. Аналіз закономірностей перетворення енергії змусив прийняти той факт, що раціональне використання енергії зводиться в кінцевому рахунку до збереження якості енергії. Приведено визначення якості енергії, встановлено зв'язок якості енергії з положеннями Другого закону, який детально опрацьовано на мікро- і макроскопічному рівнях. Описано універсальну міру якості енергії – ексергію. На понятті ексергії ґрунтується ексергетичний баланс і ексергетичний метод аналізу енергоперетворюючих процесів. Обговорено переваги ексергетичного методу в порівнянні з традиційним енергетичним

Список використаної літератури

1. Low exergy systems for high-performance buildings and communities. Annex 49 summary report IEA ECBCS. – Fraunhofer IBR. -2011. Режим доступу: www.annex49.com.
2. Бродянский В.М. Классическая термодинамика на рубеже XXI века: состояние и перспективы развития. Изв. РАН. Энергетика. – 2001.-№5. – с.17-43.

3. Эксергетические расчеты технических систем: Справ. пособие Бродянский В.М., Верхивкер Г.П., Карчев Я.Я. и др.: под ред. Долинского А.А., Бродянского В.М. АН УССР, Ин-т технической теплофизики.-Киев: Наук. думка, 1991. – 360 с.
4. Brodyanskyi W.M., Sorin M.V. and Le Goff P. The efficiency of industrial processes: exergy analysis and optimization. Amsterdam. Elsevier, 1994. - 487p.
5. Лейтес И.Л. Второй закон и его 12 заповедей. Популярная термодинамика и химическая энерготехнология. – М.: Изд-во МГУ, 2002.-176 с.
6. Kotas T.J. The exergy method of thermal plant analysis. Krieger publishing Company. Malabar, Florida, 1995,- 328 p.
7. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалец К. Эксергетический метод и его приложения. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
8. Эрдеи-Груз Т. Химические источники энергии. Пер. с нем. - М.: Мир, 1974.-304 с.
9. Fratcher W., Brodyanskyi V., Michalek K. Exergy. Theory and anwendung. Leipzig. VEB Deutcher Verlag fur Grundstoff Industrie. Leipzig.1986. - 331 S.
10. Szargut J. Exergy method: technical and ecological application. Wit Press, Southampton, Boston, 2005, -160 p.
11. Szargut J., Moris D.R., Steward F.R. Exergy analysis of thermal chemical and metallurgical processes. Hemisphere Publ. Corp, 1988, New York - 332 p.
12. Сажин Б.С., Булеков А.П., Сажин В.Б. Эксергетический анализ работы промышленных установок. – М., Москов. гос. текст. ун-т, 2000. – 297 с.
13. Fratcher W., Stephan K. and others. Strategy of Waste Energy Usage and the Conception of Entropy Economics. Berlin Brandenburg Academy of Sciences and Humanities, 2000. – 39 p.
14. Гомоюнов К.К. Совершенствование преподавания общественных и технических дисциплин. Методологические аспекты анализа и построения учебных текстов. Изд. 2-е. – СПб: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 1993. – 252 с.
15. Янтовский Е.И. Поток энергии и эксергии. М.: Наука, 1988. – 144 с.
16. Эткинс П. Порядок и беспорядок в природе. – М.: Мир, 1987. – 224 с.
17. Куделя П.П. Методи термодинамічного аналізу установок та систем [Електронний ресурс]: навчальний посібник /П.П.Куделя, Г.Б.Варламов. - Київ: НТУУ «КПІ», Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/453>.
18. Бродянский В.М. Энергия: проблема качества. // Наука и жизнь. – 1982.-№ 3. с.88-95.
19. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. Пер. с англ. – М.: Мир, 2002. - 461 с.
20. Baehr H.D. Thermodynamik. Eine Einführung in die Grundlagen und ihre technischen Anwendungen. Vierte, Neunte Auflage – Berlin: Springer, 1996. – 460 S.
21. Бэр Г.Д. Техническая термодинамика. Перев. с нем., Изд-во «Мир», М.: 1977. – 518 с.
22. Гохштейн Д.П. Современные методы термодинамического анализа энергетических установок. М.: Энергия, 1969. – 367 с.
23. Bijan A. Entropy Generation through Heat and Fluid Flow. Wiley, New York, 1994. – 248 p.
24. Kenneth Wark Jr. Advanced Thermodynamics for Engineers. McGraw-Hill, 1994, - 564 p.
25. Костенко Г.Н. Эксергетический анализ тепловых процессов и установок (теоретические основы вопроса). Политехн. ин-т. – Одесса: 1964. – 32 с.
26. Костенко Г.Н. Термодинамически объективная оценка эффективности тепловых процессов.// Пром.теплотехника. 1983. – т.5, N 4, - с.70-75.
27. Бродянский В.М. О терминологической базе современной инженерной термодинамики. – Изв. РАН, М.: 2007, - с.21-27.
28. Александров А.А. Термодинамические основы теплоэнергетических установок. Изд-во МЭИ, 2004. – 158 с.
29. Бродянский В.М. Эксергетический метод и перспективы его развития. //Теплоэнергетика, № 2, 1988 – с.14-17.

P. Kudelya, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID 0000-0003-4941-5795**
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
S. Dubovskiy, Dr. Eng. Sc., SRF, **ORCID 0000-0001-9418-2092**
Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine

ENERGY AND EXERGY APPROACHES TO THE PROBLEM OF RATIONAL ENERGY USE

The work is devoted to two methods of analysis of energy-converting processes - energy and exergy and the role of thermodynamic characteristics in them - quantity (constant value) and quality (variable property). The main attention is paid to the exergetic method and qualitative characteristics of energy, understanding of its physical meaning, establishing the connection of energy quality with the provisions of the Second Law of Thermodynamics, which correspond to the modern level of thermodynamic science, describing the universal quality of various forms of energy – the exergy and its importance for solving problems of rational energy use. This work can be useful for those who are interested in a better understanding of the provisions of the Second Law, the basics of the exergetic method and its practical application.

Keywords: *energy saving, First law, Second law, Second law analysis, energy quality, exergy, dissipation, entropy production.*

REFERENCES

1. Low exergy systems for high-performance buildings and communities. Annex 49 summary report IEA ECBCS. – Fraunhofer IBR. -2011. Rezhim dostupu: www.annex49.com.
2. Brodyanskiy V.M. Klassicheskaya termodinamika na rubezhe HHI veka: sostoyanie i perspektivy razvitiya. Izv. RAN. Energetika. – 2001.-#5. – s.17-43.
3. Eksergeticheskie raschetyi tehnikeskikh sistem: Sprav. posobie Brodyanskiy V.M., Verhivker G.P., Karchev Ya.Ya. i dr.: pod red. Dolinskogo A.A., Brodyanskogo V.M. AN USSR, In-t tehnikeskoy teplofiziki.-Kiev: Nauk. dumka, 1991. – 360 s.
4. Brodyanskiy W.M., Sorin M.V. and Le Goff P. The efficiency of industrial processes: exergy analysis and optimization. Amsterdam. Elsevier, 1994. - 487p.
5. Leytes I.L. Vtoroy zakon i ego 12 zapovedey. Populyarnaya termodinamika i himicheskaya energotekhnologiya. – M.: Izd-vo MGU, 2002.-176 s.
6. Kotas T.J. The exergy method of thermal plant analysis. Krieger publishing Company. Malabar, Florida, 1995,- 328 P.
7. Brodyanskiy V.M., Fratsher V., Mihalek K. Eksergeticheskiy metod i ego prilozheniya. M.: Energoatomizdat, 1988. – 288 s.
8. Erdei-Gruz T. Himicheskie istochniki energii. Per. s nem. - M.: Mir, 1974.-304 s.
9. Fratcher W., Brodyanskiy V., Michalek K. Exergy. Theory and anwendung. Leipzig. VEB Deutcher Verlag fur Grundstoff Industrie. Leipzig.1986. - 331 S.
10. Szargut J. Exergy method: technical and ecological application. Wit Press, Southampton, Boston, 2005, -160 p.
11. Szargut J., Moris D.R., Steward F.R. Exergy analysis of thermal chemical and metallurgical processes. Hemisphere Publ. Corp, 1988, New York - 332 p.
12. Sazhin B.S., Bulekov A.P., Sazhin V.B. Eksergeticheskiy analiz raboty promyshlennyykh ustanovok. – M., Moskov. gos. tekst. un-t, 2000. – 297 s.
13. Fratcher W., Stephan K. and others. Strategy of Waste Energy Usage and the Conception of Entropy Economics. Berlin Brandenburg Academy of Sciences and Humanities, 2000. – 39 p.
14. Gomoyunov K.K. Sovershenstvovanie prepodavaniya obschestvennykh i tehnikeskikh distsiplin. Metodologicheskie aspekty analiza i postroyeniya uchebnykh tekstov. Izd. 2-e. – SPb: Izd-vo S.-Peterburgskogo un-ta, 1993. – 252 s.
15. Yantovskiy E.I. Potoki energii i eksergii. M.: Nauka, 1988. – 144 s.
16. Etkins P. Poryadok i besporyadok v prirode. – M.: Mir, 1987. – 224 s.
17. Kudelya P.P. Metodi termodinamicheskogo anallzu ustanovok ta sistem [Elektronniy resurs]: navchalniy posibnik /P.P.Kudelya, G.B.Varlamov. - Kiyv: NTUU «KPI», Rezhim dostupu: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/453>.
18. Brodyanskiy V.M. Energiya: problema kachestva. // Nauka i zhizn. – 1982.-# 3. s.88-95.
19. Prigozhin I., Kondepudi D. Sovremennaya termodinamika. Ot teplovykh dvigateley do dissipativnykh struktur. Per. s angl. – M.: Mir, 2002. - 461 s.
20. Baehr H.D. Thermodynamik. Eine Einführung in die Grundlagen und ihre technischen Anwendungen. Vierte, Neunte Auflage – Berlin: Springer, 1996. – 460 S.
21. Ber G.D. Tehnicheskaya termodinamika. Perv. s nem., Izd.-vo «Mir», M.: 1977. – 518 s.
22. Gohshteyn D.P. Sovremennyye metody termodinamicheskogo analiza energeticheskikh ustanovok. M.: Energiya, 1969. – 367 s.
23. Bijan A. Entropy Generation through Heat and Fluid Flow. Wiley, New York, 1994. – 248 p.
24. Kenneth Wark Jr. Advanced Thermodynamics for Engineers. McGraw-Hill, 1994, - 564 p.
25. Kostenko G.N. Eksergeticheskiy analiz teplovykh protsessov i ustanovok (teoreticheskie osnovy voprosa). Politehn. in-t. – Odessa: 1964. – 32 s.
26. Kostenko G.N. Termodinamicheski ob'ektivnaya otsenka effektivnosti teplovykh protsessov.// Prom.teplotekhnika. 1983. – t.5, N 4, - s.70-75.
27. Brodyanskiy V.M. O terminologicheskoy baze sovremennoy inzhenernoy termodinamiki. – Izv. RAN, M.: 2007, - s.21-27.
28. Aleksandrov A.A. Termodinamicheskie osnovy teploenergeticheskikh ustanovok. Izd-vo MEI, 2004. – 158 s.
29. Brodyanskiy V.M. Eksergeticheskiy metod i perspektivy ego razvitiya//Teploenergetika, # 2, 1988 – s.14-17.

Надійшла 21.05.2020
Received 21.05.2020