

Ю. А. Селіхов, канд. техн. наук, професор, К. О. Горбунов, канд. техн. наук, професор,
І. Б. Рябова, канд. техн. наук, професор, Е. Р. Нагорний, аспірант,
І. В. Пільник, аспірант, В. Г. Рись, аспірант

ВИМІРЮВАННЯ ТА НАДІЙНІСТЬ ВИРОБНИЦТВА ЕКСЕРГІЇ В ЕНЕРГЕТИЧНІЙ УСТАНОВЦІ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: вимірювання, надійність, виробництво ексергії, довкілля, оточення системи, різниця потенціалів, інженерна позиція, потоки енергії, потоки речовин, енергетичні баланси, ексергетичний баланс, оцінка придатності, температурний потенціал енергії, газові котли, електричні водонагрівачі, геотермальні, ґрунтові теплові насоси, вітроелектрогенератори, джерела ресурсів, мінеральна сировина, паливо, геотермальні води, сонячне випромінювання, джерела енергії, ексергетичний метод розрахунку, термодинамічні методи розрахунку, акумулювання, акумулятори постійного струму.

Постановка задачі. Класичний апарат термодинамічних методів розрахунку часто виявляється недостатнім для вирішення нових завдань, пов'язаних з переробкою речовини та енергії. Необхідно не тільки його розвиток, а й поєднання з елементами системного підходу та економіки.

Під впливом цих вимог був розроблений ексергетичний метод розрахунку [1]. Його основна ідея полягає у введенні поряд із загальним, фундаментальним поняттям енергії, додаткового показника – ексергії, який дозволяє врахувати той факт, що енергія в залежності від зовнішніх умов може мати різну цінність для практичного використання (наприклад, одна і та ж кількість теплоти при різному температурному потенціалі джерел).

Розрахунки енергетичних балансів та різних характеристик технічних систем з урахуванням ексергії дають можливість найбільш просто та наочно вирішувати безліч наукових, технічних та техніко-економічних завдань. Вони допомагають виключити помилки, що часто зустрічаються, пов'язані з ігноруванням якісної сторони енергетичних перетворень [2].

Для технічних і техніко-економічних додатків термодинаміки важливо враховувати не тільки процеси всередині системи, а й усі можливі види взаємодії потоків енергії та робочих тіл, пов'язані з аналізованою системою, поза межами. Тільки так можна дати повну інженерну оцінку придатності та корисності всіх потоків енергії або речовини за даних параметрів і на її основі зробити аналіз технічної системи з позицій енергетики та економіки [3].

Отже, загальне уявлення про оточення системи як про все те, що знаходиться за її межами, у цьому випадку недостатньо і має бути розвинене більш детально відповідно до реальних умов роботи систем. Перш за все, необхідно виділити ту частину оточення системи, в якій немає істотних з інженерних позицій різниць потенціалів. Ця "рівноважна" (а точніше, квазірівноважна) частина оточення, яка сама по собі не може служити джерелом роботи будь-якого виду, називається навколишнім середовищем.

Таким чином, вимірювання та надійність виробництва ексергії в енергетичних установках, використовуваних для різних умов роботи, є актуальними завданнями.

Мета статті. На прикладі енергетичної установки показати ефективність вимірювання та надійності виробництва ексергії. У прототипі енергетичної установки застосовується: газовий котел. А в новій енергетичній установці використовується: електричний водонагрівач, геотермальний ґрунтовий тепловий насос "ґрунт-вода" і вітроелектрогенератор [4].

В статті доквіллям є атмосфера. Параметри доквілля приймаємо постійними.

Поряд з навколишнім середовищем в оточенні системи можуть знаходитися об'єкти, що відрізняються від рівноважної частини тими або іншими параметрами (наприклад, температурою, тиском, хімічним потенціалом) і здатні служити джерелами речовини і енергії (або – джерелами ресурсів) для аналізованої системи (поклади мінеральної сировини, палива, геотермальні води, сонячне випромінювання). Джерелами енергії в рамках нашої статті є газовий котел, електричний водонагрівач, геотермальний ґрунтовий тепловий насос "ґрунт-вода" і вітроелектрогенератор.

Обчислення, пов'язані як з джерелами речовини та енергії, так і з системою, що аналізується, проводимо відносно частини оточення системи, що перебуває в рівновазі, тобто доквілля. Вона виконує роль референтного рівня ексергії [5]. В якості референтного рівня на практиці використовується конкретне, так зване локальне середовище. Наприклад, в нашій енергетичній установці для обігріву використовується прісна вода, тому ми вважаємо її базовим рівнем ексергії.

Для "живлення" системи та забезпечення її безперервної роботи використовуються вітроелектрогенератор, електричний водонагрівач та геотермальний тепловий насос "ґрунт-вода". Комбінація зазначених джерел і навколишнього середовища становить середовище, на яке впливає система, що нами розглядається.

Процеси зміни стану енергії та речовини, які обумовлюють функціонування технологічних процесів, можуть бути пов'язані з енергією різного типу. Попри їхню схожість, є також обмеження на можливість перетворення одного виду енергії в інший, пов'язані з другим початком термодинаміки. Ці межі є вкрай важливими для практики, всі типи енергоносіїв поділено на дві групи за ступенем їхньої перетворюваності. Перша група містить види енергії, які можуть бути повністю перетворені в будь-який інший вид енергії без обмежень, а друга група включає ті види енергії, котрі повністю не можуть бути перетворені в жоден інший вид енергії [6, 7].

Типи енергії першої групи володіють ентропією, що дорівнює нулю ($S = 0$), іншими словами, їм не властива ентропія. Енергія такого типу іноді називається "організованою" або "безентропійною". Типи ж енергії другої групи мають ентропію, відмінну від нуля ($S > 0$), тобто їм властива ентропія, і енергія цих типів називається "неорганізованою" або "ентропійною".

За другим законом термодинаміки, тільки такі процеси перетворення енергії можуть відбуватися в системі, при яких сумарна ентропія залучених тіл або зростає, або (при зворотних процесах) лишається незмінною. Отже, види "безентропійної" енергії (перша група) можуть здійснювати всі перетворення, бо в кожному випадку ентропія буде або постійною, або збільшуватиметься, але не зменшуватиметься. На противагу цьому, над усіма типами енергій другої групи неможливо здійснити перетворення, які б призводили до зменшення ентропії даної системи. Тобто, дані різновиди не можуть бути повністю перетворені в будь-який вид "безентропійної" енергії.

З технічної точки зору, будь-яка "безентропійна" енергія з необмеженою конвертованістю, як правило, є більш цінною, "кращою" та "ентропійнішою", ніж енергія першої групи, адже будь-яку енергію другої групи можна завжди отримати з енергії першої групи, але не навпаки. Відповідно до коефіцієнту конверсії, в нашому проекті енергія вітру, тепло від електричного водонагрівача та теплового насоса належать до другої групи [8].

Пряме підсумовування і порівняння окремих типів енергії у другій групі неприйнятне, тому що вони не є додатковими. Окрім енергетичних балансів, де має значення лише кількість енергії. Щоб зробити їх співставними, необхідний уніфікований підхід, який би давав змогу кількісно оцінити енергію, враховуючи її якісні особливості.

Цим єдиним підходом є ексергія – величина роботи, що може бути здійснена за рахунок зовнішнього джерела енергії при термодинамічній взаємодії термодинамічної системи або енергетичного потоку з середовищем до моменту встановлення її повної динамічної рівноваги.

Визначаючи ексергію, слід враховувати, перш за все, власне систему (або потік енергії), виконану роботу зовнішнім приймачем енергії та середовище, в якому знаходиться система. Аналізована ексергетичним методом система може бути простою (наприклад, певне робоче тіло в замкнутому об'ємі або потоці) і складною (велика енергетична, хімічна або інша установка, комплекс установок, індустрія, область, регіон, країна). Проте в кожному випадку слід розглядати ті властивості системи, що дозволяють її представити як термодинамічну. В нашому випадку система є комплексною [9].

Системи бувають закритими (тобто без обміну речовин із навколишнім середовищем та/або об'єктами в ньому), відкритими (з таким обміном), фіксованими (з параметрами, що не змінюються в часі) та нефіксованими. В даному проекті система є відкритою в частині вітроелектрогенератора, електричного водонагрівача та теплового насоса, а також нестаціонарною [10].

У стані повної рівноваги системи та навколишнього середовища ексергія дорівнює нулю. Цей стан системи називають нульовим або мертвим станом. Робота, яка відповідно до визначення ексергії служить її мірою, не обов'язково є необхідним кінцевим результатом, тобто метою будь-якої аналізованої системи або енергетичного потоку. За сучасних умов результатом такої дії, окрім виконання роботи, можуть бути перетворення і отримання різних речовин, тепла, холоду, випромінювання необхідних параметрів тощо. Тому в визначенні ексергії слово "робота" може бути замінено більш ширшим терміном "енергія, яка не характеризується ентропією". Робота застосовується тільки як міра такої енергії, а не як обов'язкова кінцева мета енергоперетворень. За Першим і Другим принципами термодинаміки, в кожному даному стані ексергія системи, так само як і її енергія, має деяке постійне фіксоване значення, так як зворотний процес узгодження її інтенсивних параметрів з параметрами зовнішнього оточення однозначно описується роботою. Процес взаємодії системи з середовищем може бути як оборотним (ідеальний процес), так і незворотним (реальний процес). Ідеальний процес (за визначенням ексергії) призводить до виконання роботи, що дорівнює ексергії. У разі зупинки процесу до досягнення балансу між параметрами системи і середовища виконана робота дорівнюватиме втраті ексергії системи.

В умовах реального процесу робота є меншою за втрату ексергії (зрештою, робота може дорівнювати нулю), тому що частина ексергії не переходить у роботу, а просто зникає. Це одна з істотних відмінностей між ексергією та енергією. Ексергія підпорядковується закону збереження лише у зворотних процесах, у решті випадків (реальні

системи) може частково або повністю зникнути, втрачатися в результаті дисипації (розсіювання) енергії в необоротних процесах. І чим менша ця зміна ексергії за інших рівних умов, тим більш термодинамічно ідеальним є процес.

Ексергетичний баланс

Рівняння ексергетичного балансу універсально [2] і повністю придатне для будь-яких термодинамічних систем незалежно від видів енергії, які беруть участь у процесі:

$$\sum E' \geq (\sum E'' + \Delta E), \quad (1)$$

$$\sum D = \sum E' - (\sum E'' + \Delta E), \quad (2)$$

де ΔE – збільшення ексергії системи між початковою та кінцевою точками процесу.

Для стаціонарного в часі процесу $\Delta E = 0$ і $\sum D = \sum E' - \sum E''$. Відповідне рівняння енергетичного балансу має вигляд:

$$\sum W' = \sum W'' + \Delta W. \quad (3)$$

Для стаціонарного в часі процесу $\Delta W = 0$. Відповідне рівняння енергетичного балансу має вигляд:

$$\sum W' = \sum W'', \quad (4)$$

де ΔW – збільшення енергії системи між початковою і кінцевою точками процесу.

На відміну від рівняння (3) нерівність (1) і рівняння (2) опираються як на Перший, так і на Другий початки термодинаміки, оскільки вони відбивають ексергетичний баланс системи. Принципова різниця між рівняннями (1) і (3) полягає в тому, що в другому при всіх умовах рівність правої і лівої частин дотримується, а в першому ліва частина в реальних процесах завжди більше правої.

Таким чином, енергетичний баланс по своїй природі не може описати втрати від необоротності процесів у розглянутій системі, тому що незалежно від ступеня її термодинамічної досконалості рівняння (3) буде завжди справедливо. Тому визначення якісних енергетичних характеристик системи по рівнянню (3) проводиться в кожному випадку умовно шляхом виключення із сумарної енергії $\sum W$ тієї частини енергії, яка в даному процесі не використовується (або надходить із навколишнього середовища без витрат).

Ексергетичний баланс, навпаки, у всіх випадках показує втрати від необоротності в системі. Ступінь її термодинамічної досконалості також визначається однозначно відношенням:

$$\frac{\sum E''}{\sum E'} = \frac{\sum E' - \sum D}{\sum E'} = \eta_t. \quad (5)$$

Терміни «втрати енергії» і «втрати ексергії» мають принципово різний зміст. Перший означає втрату енергії не взагалі (енергія зникати, як відомо, не може), а втрату її для даної системи або даної мети, у випадку, якщо частина енергії непридатна для неї

за своєю формою або параметрам. Другий, навпаки, означає, повне зникнення ексергії, тобто її знищення, пов'язане з дисипацією енергії.

На базі основних балансових рівнянь розроблена єдина методика рішення ряду завдань ексергетичного аналізу. Величини $\sum E$ і ΔE у кожному випадку включають ексергію тих видів речовини і енергії, які входять в енергетичний баланс розглянутої системи. Як правило, це ексергія потоку робочого тіла E , ексергія теплового потоку E_q , а також робота L (рівна енергії W для механічної або електричної енергії).

Величина ΔE (у стаціонарних процесах вона дорівнює нулю) визначається збільшенням ексергії речовини в об'ємі.

Методика оптимізації по сумі питомих витрат ексергії

В рамках техніко-економічної модернізації на основі методу ексергії слід брати до уваги час існування технічного об'єкта, а також зміни, що сталися в рамках системи, яка досліджується, з моменту її створення, та зміни, які відбудуться після закінчення її експлуатації. До моменту будівництва в границях перебуває лише зовнішнє оточення. В результаті будівництва об'єкта крізь границі системи починається перетікання ексергії у вигляді потоків речовин та енергії, а після завершення спорудження стає можливим виведення трансформованої ексергії та вихід на стан стаціонарності протягом терміну експлуатації. Врешті-решт, після того, як увесь строк служби відслужено, відбувається демонтаж технічного об'єкту (з частковою регенерацією матеріалів).

Кількісно описану «історію» можна відтворити за рахунок ексергетичного балансу, якщо переходити від витрат ексергії в одиницю часу до їх сумарної величини за увесь період експлуатації технічного об'єкту. Ексергія перетікає через межі технічної системи з паливним потоком $E_{\text{підв}}$, на доставку якого необхідно використати зовнішню ексергію $E_{\text{зовн}}$. Від об'єкта відокремлюються перетворена ексергія $E_{\text{відв}}$ та зовнішні втрати ексергії з відпрацьованими газами. Дані значення беруться для всього строку експлуатації об'єкту $\tau \cdot E$. Від часу прийняття відповідного рішення про будівництво електростанції для отримання електричної чи теплової енергії починається не власне виробництво, а споживання ексергії на виробництво обладнання, виконання будівельних та монтажних робіт. Нерідко такі затрати розпочинаються ще до прийняття рішення про конкретну станцію у зв'язку з виробництвом стандартного обладнання, виплавою металу для нього, будівництвом, а також (за необхідності) заводів з виробництва обладнання.

Процес створення ексергії відбувається лише через декілька наступних років після введення в експлуатацію першого енергоблоку, і продовжується впродовж кількох десятиліть, поки обладнання морально не застаріє або не буде фізично зношене.

До того ж, протягом усього терміну експлуатації теплоелектростанції (ТЕС) енергія витрачається на забезпечення поточних операцій (видобуток і транспортування палива тощо). Такі затрати подібні до власних потреб теплової електростанції, якщо їх розглядати в комплексі з урахуванням вироблення палива.

Підведена ексергія:

$$E_{\text{підв}} = \int_{\tau_c}^{\tau_e} E_{\text{підв}} d\tau. \quad (6)$$

Відведена ексергія:

$$E_{\text{відв}} = \int_0^{\tau_e} E_{\text{відв}} d\tau. \quad (7)$$

Критерієм ефективності служить коефіцієнт ексергії-нетто:

$$K_E = E_{\text{відв}} / E_{\text{стр}}, \quad (8)$$

де $E_{\text{відв}}$ – ексергія, одержувана в одиницю часу; $E_{\text{підв}}$ – витрати ексергії за одиницю часу; τ_e – час виготовлення устаткування і будівництва установки; τ_e – строк експлуатації установки; $\tau_e = 0$ – момент введення в експлуатацію першого агрегату; $E_{\text{стр}}$ – уся ексергія, витрачена на будівництво установки і створення устаткування (не входить ексергія природних енергоресурсів – геотермальної води, палива, і т.п., яка забезпечує після перетворення одержання корисної енергії).

Строк енергетичної окупності, $\tau_{\text{ок}}$ – період часу, протягом якого отримана ексергія компенсує витрачену, – визначається з рівняння (8).

$$\int_0^{\tau_{\text{ок}}} E_{\text{відв}} d\tau = E_{\text{стр}}. \quad (9)$$

За відрізок часу, що пройшов від початку енергетичної окупності до завершення строку експлуатації установки, остання видає ексергію-нетто. Відношення цих величин дає додатковий критерій:

$$K_\tau = \tau_e / \tau_{\text{ок}}. \quad (10)$$

Найбільш ефективним при розрахунку ексергії-нетто вважається такий проект, у якому величини K_E та K_τ максимальні.

Розрахунок ексергії-нетто для будь-якого технічного об'єкта зводиться до наступного:

1. Обчислення підведеного і відведеного потоків вектора щільності потоку ексергії δ_e через поверхню F – границю термодинамічної системи, усередині якої укладений розглянутий об'єкт:

$$E = \iint_F \delta_e \cdot dF \approx \delta_e \cdot F, \quad (11)$$

що завершується розрахунком ексергетичного ККД:

$$\eta_\tau = \frac{E_{\text{відв}}}{E_{\text{підв}}} = 1 - \frac{D}{E_{\text{підв}}}. \quad (12)$$

2. Розрахунок повних витрат ексергії на створення об'єкта

$$E_{\text{стр}} = \sum_i^n M_i \left(\frac{W_{\text{доб}}}{\eta_{\text{доб}}} + \frac{\Delta G}{\eta_{\text{відн}}} + \frac{W_{\text{пр}}}{\eta_{\text{пр}}} \right) + W_{\text{ост}}, \quad (13)$$

де M_i – маса деталі з матеріалу i ; $W_{\text{доб}}$ – теоретично мінімальна робота з руйнування породи і видобутку сировини; $\eta_{\text{доб}}$ – ексергетичний ККД видобутку сировини; ΔG – енергія Гиббса реакції відновлення (металургійного процесу); $\eta_{\text{відн}}$ – ексергетичний ККД процесу відновлення; $W_{\text{пр}}$ – теоретична робота деформації при прокаті; $\eta_{\text{пр}}$ – витрати ексергії на обробку, складання і транспорт усіх елементів розглянутого об'єкта; n – число всіх деталей.

Як правило, $W_{\text{ост}} < 0,2 \cdot E_{\text{стр}}$, і цю величину можна врахувати шляхом введення коефіцієнта до основного компонента — витратам ексергії на одержання матеріалів.

3. Визначення повної витрати ексергії E за весь термін служби об'єкта τ_e :

$$E = \int_0^{\tau_e} E d\tau \approx E \tau_e. \quad (14)$$

В основі оцінки – вимога обов'язкової економії первинної ексергії (палива) в енергетичному комплексі країни за допомогою застосування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [11]. У розрахунку враховуються поточні витрати палива на кожний з варіантів і витрати на їхнє створення. Оскільки в ряді випадків ВДЕ вимагає додаткового традиційного джерела енергії [12] для одержання гарантованої потужності, допускається поточна витрата палива у ВДЕ в зменшеній кількості [13]. Це враховується як підвищення деякого умовного ККД нового варіанта.

Загальне споживання ексергії для ВДЕ розраховується як сума затрат на видобування і переміщення руди та іншої сировини, металургійні процеси плавлення і прокатки, виробництво пластмас та інших неметалевих матеріалів, виробництво комплектуючих, зварювальних робіт і збірку всього технологічного обладнання, а також на будівництво споруд, будівель і доріг, включаючи житлові селища. Дозволяється приблизний підрахунок використання ексергії як добутку маси кожної з основних матеріалів M на питому енергоємність матеріалу E (МДж/кг або кг у.п./кг).

Витрата ексергії на переробку та збірку врахована з коефіцієнтом, що не перевищує 1,2 для основного енергетичного обладнання (котел, турбіна, генератор). Приблизні величини енергоємності матеріалів E , обрані за графіком з літературних джерел [2].

Рішення про придатність або непридатність проекту ВДЕ до подальшого пророблення ухвалюється залежно від знака нерівності $\tau_{\text{ок}} \geq \tau_{\text{норм}}$ (тут $\tau_{\text{норм}}$ – нормативний строк), де строк енергетичної окупності $\tau_{\text{ок}}$ ВДЕ визначається прирівнюванням сумарних витрат первинної ексергії Π за прототипом (а) і новому (b) варіантам.

$$\Pi = \sum M_a \cdot E_a + \frac{N}{\eta_a} \cdot \tau_{\text{ок}} = \sum M_b \cdot E_b + \frac{N}{\eta_b} \cdot \tau_{\text{ок}}. \quad (15)$$

Термін окупності вітроустановки, електричного водонагрівника і ґрунтового теплового насосу:

$$\tau_{\text{ок}} = \frac{\sum m_b \mathcal{E}_b - \sum m_a \mathcal{E}_a}{1/\eta_a - 1/\eta_b}, \quad (16)$$

де $m_a = \frac{M_a}{N}$, $m_b = \frac{M_b}{N}$ – питомі витрати ексергії в прототипі та новому варіантах відповідно; N – гарантована потужність, що віддається, однакова для обох порівнюваних варіантів, η_a , η_b – ексергетичний ККД порівнюваних варіантів по використанню первинної ексергії.

Якщо ВДЕ дає гарантовану потужність без додаткового підключення до традиційного джерела енергії, то поточних витрат первинної енергії немає і можна вважати $\eta_b = \infty$. Тоді строк окупності може бути визначений за формулою

$$\tau_{\text{ок}} = \frac{\eta_a}{3600 \cdot h} (\sum m_b \mathcal{E}_b - \sum m_a \mathcal{E}_a), \quad (17)$$

де h – час роботи установки за рік, год/рік.

ККД нової установки:

$$\eta_b = \frac{h}{h_a} \eta_a, \quad (18)$$

де h_a – час, коли установка не працює, год/рік.

Розглянувши роботу прототипу (системи гарячого водопостачання і опалення котеджу) [14] енергетичної установки, нами були визначені недоліки в роботі та зроблені висновки. Схема роботи прототипу представлена на рис. 1.

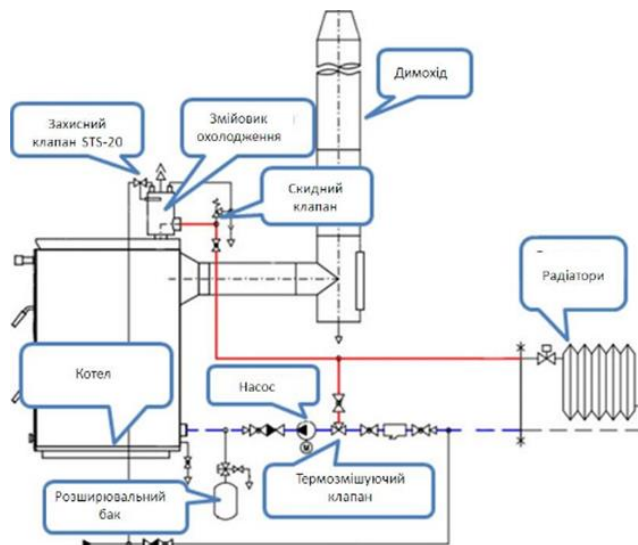


Рисунок 1 – Принципова схема системи гарячого водопостачання і опалення котеджу (прототипу)

Аналіз роботи системи гарячого водопостачання і опалення будинку (прототип) з використанням газового котла виявив наступні недоліки:

1. Складний пристрій закритого газового пальника для побутового котла має складну конструкцію, що ускладнює ремонтні роботи.
2. Чим більше деталей, тим частіше ламається обладнання.
3. «Турбований» агрегат коштує на 10–15 % дорожче порівняно з атмосферними аналогами.
4. Підвищений рівень шуму, який залежить від обраної модифікації. Вбудований в систему вентилятор сильно гуде.
5. У разі відключення електрики обладнання припиняє роботу. Вирішити цю проблему допоможе придбання джерела безперебійного живлення.
6. Найпростішим вважається спосіб розпалювання з гнотом – з палаючим запальником. При спрацюванні автоматики, газ підпалюється гнотом, після чого прилад починає гріти воду. Негативних моментів у цьому два – підвищена витрата палива та недостатній ступінь безпеки, оскільки запальник може згаснути. Первинний розпал виконується сірниками або із застосуванням п'єзoeлементa. Другим способом є електронний розпал газового приладу – його забезпечує високовольтний перетворювач, енергія для якого надходить за рахунок електрики або батарейок.
7. Живлення електроенергією здійснюється за допомогою магістральної електромережі, яка може відключатися.

Розглянувши всі недоліки вищезазначеної технологічної схеми ми прийняли таке рішення:

- 1) замінити котел з газовим пальником на систему, що забезпечує приватне домоволодіння гарячою водою за допомогою електричного водонагрівника, опалювання за допомогою геотермального ґрунтового теплового насоса "ґрунт-вода", батареї опалювання на водяну теплу підлогу, магістральну електромережу на вітроелектроенергетичну установку;
- 2) поліпшити конструкцію системи опалення, застосувавши нове обладнання;
- 3) підвищити ККД теплового насоса за рахунок застосування нових матеріалів, теплоносіїв та іншого допоміжного обладнання;
- 4) виконати оптимізацію, інтеграцію та автоматизацію основних вузлів теплового насосу;
- 5) удосконалити роботу теплоенергетичної установки за допомогою ЕОМ;
- 6) зменшити вартість установки за рахунок зниження матеріалоємності установки, застосування нових матеріалів і встановлення нового обладнання;
- 7) зробити теплотехнічні розрахунки теплового насосу;
- 8) зробити розрахунки вітроелектроенергетичної установки;
- 9) розробити нову технологічну схему.

Спроектовано, виготовлено та встановлено [11, 15, 16] нову енергетичну установку у приватному домоволодінні, принципова технологічна схема якої представлена на рис. 2.

Принцип роботи установки при роботі у теплу пору року.

Вода із свердловини 1 циркуляційним насосом 2 подається в апарат хімводоочищення 3, де очищується від багатьох солей і надходить в бак-акумулятор 4. Далі циркуляційним насосом 5 вода подається в електричний водонагрівач 6, де нагрівається до температури 75 °С, і надходить в бак-акумулятор 7. З бака-акумулятора 7 циркуляційним насосом 9 вода подається у другий контур 10 охолоджувача і другий контур 12

конденсатора ґрунтового теплового насоса "ґрунт-вода" і поступає користувачу 17 на гаряче водопостачання і опалення. Зворотна вода від користувача 17 подається в установку хімоводоочищення 18, де очищається, і циркуляційним насосом 19 по трубопроводам 26 подається в бак-акумулятор 4. У разі аварійної ситуації є можливість випустити теплоносії у каналізацію 8 (злив води із системи). Якщо зовнішня температура підвищується до дискомфортного рівня, тепловий насос вмикає кондиціювання повітря. Циркуляційним насосом 23 вода з ґрунтового теплообмінного колектора 25 надходить до контуру теплої підлоги, охолоджує поверхню підлоги і повітря в кімнатах будинку до оптимальної комфортної температури.

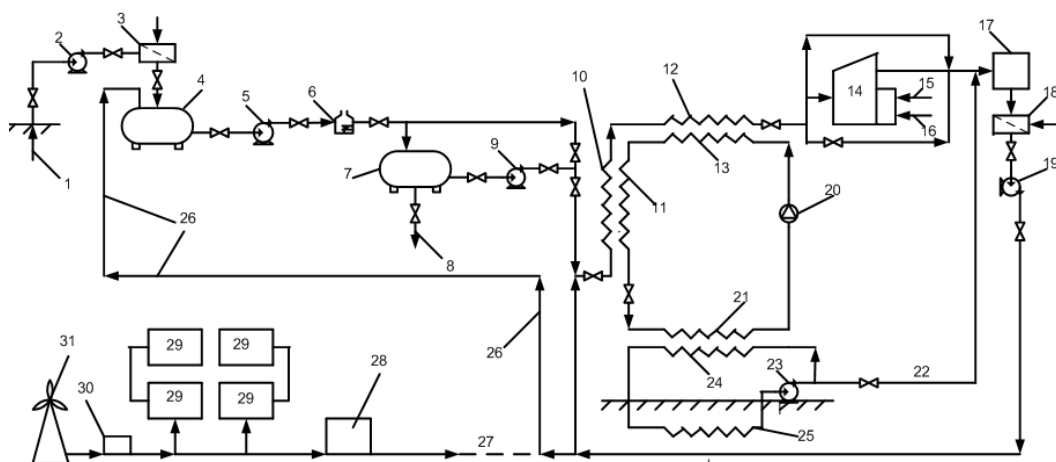


Рисунок 2 – Принципова технологічна схема нової енергетичної установки

- 1 – свердловина води; 2 – циркуляційний насос; 3, 18 – апарати хімоводоочищення;
- 4 – бак-акумулятор; 5 – циркуляційний насос; 6 – електричний водонагрівник;
- 7 – бак-акумулятор; 8 – злив теплоносія з установки; 9 – циркуляційний насос;
- 10 – другий контур підігрівача ґрунтового теплового насоса "ґрунт-вода";
- 11 – перший контур підігрівача ґрунтового теплового насоса "ґрунт-вода";
- 12 – другий контур конденсатора ґрунтового теплового насоса "ґрунт-вода";
- 13 – перший контур конденсатора ґрунтового теплового насоса "ґрунт-вода";
- 14 – тепловий дублер; 15 – газовий пальник; 16 – подача повітря в тепловий дублер;
- 17 – приватне домоволодіння; 19 – циркуляційний насос; 20 – компресор ґрунтового теплового насоса "ґрунт-вода";
- 21 – перший контур випарника ґрунтового теплового насоса "ґрунт-вода";
- 22 – трубопровід подачі холодного теплоносія (режим кондиціювання);
- 23 – циркуляційний насос; 24 – другий контур випарника ґрунтового теплового насоса "ґрунт-вода"; 25 – тепловий контур ґрунтового теплового насоса;
- 26 – трубопровід оборотного теплоносія; 27 – електроз'єднання змінного струму 220 в;
- 28 – інвертор; 29 – акумулятори постійного струму 48 в; 30 – контролер; 31 – вітрогенератор

Механізм дії системи для функціонування цілорічної експлуатації.

Протягом теплої пори року принцип роботи наведено вище. У холодну пору року система працює наступним образом.

Вода з температурою $5 \div 7$ °С теплообмінного колектора 25 ґрунтового теплового насоса циркуляційним насосом 23 подається в другий контур 24 випарника теплового насоса, де нагріває холодоагент першого контуру 21, який перетворюється в пару. Пара холодоагенту надходить у компресор 20, де стискається до високої 160 °С температури та тиску. Далі пара надходить у перший контур 13 конденсатора теплового насоса, де

віддає своє тепло другому контуру 12 конденсатора [13], в який подається вода циркуляційним насосом 9 з бака-акумулятора 7, або циркуляційним насосом 19 від користувача 17. Таким чином, вода нагрівається спочатку в другому контурі 12 конденсатора, а потім у другому контурі 10 охолоджувача і надходить до користувача 17 з температурою 75 °С. Коли з ладу виходить тепловий насос і електричний водонагрівник 6, то в якості теплового дублера виступає котельна установка 14 з газовим пальником 15 і повітряним наддувом 16, яка підігріває воду до необхідної температури і подає її в систему гарячого водопостачання та опалення приватного домоволодіння. При виникненні аварії теплоносії зливається в каналізаційну систему 8. Паливний накопичувач складається з теплоізовованої ємності для накопичення енергії з теплоносієм (гарячою водою), пристрою для заповнення та зливу енергоносія, а також додаткового оснащення. Зберігання енергії являє собою фізичний або хімічний технологічний процес, при якому паливо зберігається в накопичувачі теплової енергії. Система зберігання характеризується методами, коли енергія, що надходить в акумулятор, отримується від джерела, перетворюється (при необхідності) в необхідну форму енергії і доставляється кінцевому споживачу.

Накопичення і директивне зберігання палива здійснюється в акумулюючому баку, який ми обрали тому, що середовище накопичення і теплообміну є єдиним середовищем і середовищем споживання [12]. Теплоносії може бути твердим, рідким, газоподібним або двофазним (рідина плюс газ). Для нашого випадку акумулюючим середовищем є рідина.

Розроблена та вибрана нами вітроустановка дозволяє забезпечувати приватне домоволодіння з господарством електроенергією та накопичувати її в акумуляторах постійного струму 29 потужністю 48 В. Контролер 30 та інвертор 28 дозволяє подавати необхідну електрику потужністю 220 В через електроз'єднання змінного струму 27 в приватне домоволодіння 17.

Витрати ексергії на проектування та виготовлення прототипу зазначені в таблиці

1. Витрати ексергії на проектування та виготовлення нового проекту зазначені в таблиці 2.

Таблиця 1 – Витрати ексергії на проектування та виготовлення прототипу

Матеріал	Маса M_a , кг	Питома енергоємність $\mathcal{E}_a$, МДж/кг	Повні витрати ексергії E , МДж	m_a	$m_a \cdot \mathcal{E}_a$
Котел з газовою горілкою	135	430	58050	0,0026	1,12
Ємність для повітря $V = 10 \text{ м}^3$	800	60	48000	0,0154	0,92
Металевий лист	40	60	2400	0,00077	0,046
Ізоляція, м^2	100	114	11400	0,0019	0,219
Вентилі	60	150	9000	0,00115	0,173
Розширювальний бак $V = 0,050 \text{ м}^3$	10	60	600	0,00019	0,0115

Продовження таблиці 1

Насоси, 2 шт	14	150	2100	0,00027	0,040
Трубопроводи метал.	100	60	6000	0,0019	0,1154
Трубопроводи ПВХ	120	50	6000	0,0023	0,115
Радіатори опалення 80 шт.х 8 кг	640	150	96000	0,012	1,85
Вода 0,8 м ³	800	30	24000	0,0154	0,46
Всього	—	—	263550	—	5,07
Всього з урахуван- ням витрат ексергії на обробку та збірку обладнання (коефі- цієнт 1,2)	—	—	316260	—	—

Таблиця 2 – Витрати ексергії на проектування та виготовлення нової енергетичної установки

Матеріал	Маса M_b , кг	Питома енер- гоємність $\mathcal{E}_b$, МДж/кг	Повні витрати ексергії E , МДж	m_b	$m_b \cdot \mathcal{E}_b$
1	2	3	4	5	6
Насоси, 5 шт	30	150	4500	0,00058	0,087
Ізоляція, м ²	1000	134	134000	0,019	2,58
Вентилі -20 шт.	60	150	4500	0,00115	0,173
Бак-акумулятор – 2 шт. $V = 6 \text{ м}^3$	600	60	36000	0,0115	0,69
Установка хімводоо- чищення 2 шт.	400	150	60000	0,0077	1,154
Тепловой насос – 1шт.	200	430	86000	0,0039	1,65
Вода 2,0 м ³	2000	30	60000	0,039	1,154
Трубопроводи метал.	100	60	6000	0,0019	0,115
Трубопроводи ПВХ	100	50	5000	0,0019	0,095
Акумулятори постій- ного струму – 4 шт.	400	1,146	459	0,0077	0,0088
Інвертор – 1 шт.	100	300	30000	0,0019	0, 57
Вітроустановка – 1 шт.	500	1,18	589	0,0096	0,0114
Контролер – 1 шт.	50	140	7000	0,00096	0,135
Електрокабелі	100	160	16000	0,0019	0,304
Свердловина води	120	7,1	852	0,0023	0,016
Сталь	200	7,1	1420	0,0039	0,027
Всього	—	—	452320	—	8,77
Всього з урахуванням витрат ексергії на об- робку та збірку облад- нання (коефіцієнт 1,2)	—	—	542784,00	—	—

Результати розрахунків за формулами (16)–(18) наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунків

η_a	η_b	τ_{ok} , рік
0,4	0,802	2,1

Висновки. Представлені результати розрахунків вимірювання та надійності виробництва ексергії – нетто на прикладі енергетичної установки, яка забезпечує приватне домоволодіння електроенергією, гарячим водопостачанням, опаленням та гарячим повітрям у необхідному діапазоні температур для комфортного проживання. Був обраний прототип установки і вивчена його робота. Визначені недоліки як у роботі, так і в конструкції окремих вузлів. За результатами аналізу літературних джерел було підібрано нове за ефективністю устаткування. Розрахунок ефективності заміни старого устаткування на нове проводився відповідно до методики оптимізації за сумою питомих витрат ексергії – нетто. Була розроблена нова принципова технологічна схема енергетичної установки. Спільно з вітроелектрогенератором, електричним водонагрівачем використовується тепловий насос "грунт-вода", акумулятори електроенергії та теплоти, що дозволяє: зменшити собівартість теплової енергії за рахунок зниження матеріаломісткості та витрат на обладнання, економити органічне паливо; виробляти електроенергію та надлишок її віддавати в державну електромережу; зменшити теплове навантаження та забруднення навколишнього середовища. Система автоматизації дозволяє управляти комбінованою установкою за допомогою автоматизованого робочого місця без втручання людини цілий рік.

Література

1. Бродянский В. М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетичный метод и его применение. Москва : Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
2. Бродянский В. М. Эксергетичні розрахунки технічних систем : довід. посіб. / за ред. А. А. Долинського, В. М. Бродянского ; АН УРСР, Ін-т техн. теплофізики. Київ : Наукова думка, 1991. 360 с.
3. Бродянский В. М. Эксергетичний метод і перспективи його розвитку. *Теплоэнергетика*. 1988. № 2. С. 14–17.
4. Селіхов Ю. А., Горбунов К. О., Стасов В. А. Інтеграція роботи поновлюваних джерел енергії для гарячого водопостачання та опалення будівель. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2021. № 4. С. 3–12.
5. Ясников Г. П., Белоусов В. С. Эксергетическое представление в термодинамике необратимых процессов. *Инженерно-физический журнал*. 1977. Т. 32, № 9. С. 336–341.
6. Веретельник Т. І. Эксергетичний аналіз хіміко-технологічних систем. *Вісник ЧДТУ*. 2008. № 1. С. 192–195.
7. Степанова Т. Б. Методика комплексного энергетического анализа технических систем. *Известия вузов. Проблемы энергетики*. Казань : Казан. гос. энергет. ун-т, 2000. № 9–10. С. 50–61.
8. Сорин М. В., Бродянский В. М. Расчет химической эксергии на основе модели локальной окружающей среды. *Теоретические основы химической технологии*. 1985. Т. 19, № 1. С. 91–99.

9. Шевинский Я. С., Кисленко Н. А., Бобров Д. А. Разработка автоматизированной системы эксергетического анализа сложных химико-технологических систем. *Программные продукты и системы*. 1998. № 1. С. 11–15.
10. Теплоэнергетика и теплотехника : справочник. Кн. 2 : Теоретические основы теплотехники. Теплофизический эксперимент. Москва : МЭИ, 2001. 564 с.
11. Селіхов Ю. А., Коцаренко В. О., Горбунов К. О., Рябова І. Б. Інтеграція та оптимізація роботи системи опалення котеджу. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2017. № 3. С. 15–20.
12. Бекман У., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии. Москва : Мир, 1987. 224 с.
13. Рей Д., Макмайл Д. Тепловые насосы. пер. с англ. Москва : Энергоиздат, 1982. 224 с.
14. Особливості сучасних систем водяного опалення. Київ : ПДП «Такі справи», 2003. 176 с. : іл.
15. Даффи Дж., Бекман У. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. Москва : Мир, 1977. 420 с.
16. Ляшков В. И., Кузьмин С. М. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : уч. пособ. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. 96 с.

Bibliography (transliterated)

1. Brodianskyi V. M., Fratscher V., Mikhalek K. Ekserhetycheskiy metod i ego ispol'zovanie. Moskva : Enerhoatomizdat, 1988. 288 p.
2. Brodianskyi V. M. Ekserhetychni rozrakhunky tekhnichnykh system : dovid. posib. / za red. A. A. Dolynskoho, V. M. Brodianskoho; AN URSSR, In-t tekhn. teplofizyky. Kyiv : Naukova dumka, 1991. 360 p.
3. Brodianskyi V. M. Ekserhetychnyi metod i perspektyvy yoho rozvytku. *Teploenerhetyka*. 1988. № 2. P. 14–17.
4. Selikhov Yu. A., Gorbunov K. O., Stasov V. A. Intehratsiia roboty ponovliuvanykh dzherel enerhii dlia hariachoho vodopostachannia ta opalennia budivel. *Intehrovani tekhnologii ta enerhozberezhennia*. 2021. № 4. P. 3–12.
5. Yasnykov H. P., Belousov V. S. Ekserhetycheskoe predstavleniia v termodinamike neobratymikh protsessov. *Inzhenerno-fizycheskiy zhurnal*. 1977. T. 32, № 9. P. 336–341.
6. Veretelnik T. I. Ekserhetychnyi analiz khimiko-tekhnologichnykh system. *Visnyk ChDTU*. 2008. № 1. P. 192–195.
7. Stepanova T. B. Metodyka kompleksnogo enerhetycheskogo analiza tekhnicheskikh system. *Yzvestiya vuzov. Problemy enerhetyky*. Kazan : Kazan. gos. enerhet. un-t, 2000. № 9–10. P. 50–61.
8. Sorin M. V., Brodianskyi V. M. Raschet khimicheskoy ekserhii na osnove modeli lokalnoy okruzhayushhey sredi. *Teoreticheskiye osnovy khymicheskoi tekhnologii*. 1985. T. 19, № 1. P. 91–99.
9. Shevynskiy Ya. S., Kyslenko N. A., Bobrov D. A. Razrabotka avtomatyzirovannoy systemy ekserhetychnogo analiza slozhnykh khimiko-tekhnologicheskikh system. *Prohrammnye produkty y systemy*. 1998. № 1. P. 11–15.
10. Teploenerhetyka i teplotekhnika : spravochnik. Kн. 2 : Teoreticheskiye osnovy teploekhniki. *Teplofizycheskiy eksperiment*. Moskva : MEI, 2001. 564 p.
11. Selikhov Yu. A., Kotsarenko V. O., Gorbunov K. O., Riabova I. B. Intehratsiia ta optymizatsiia roboty systemy opalennia kotedzhu. *Intehrovani tekhnologii ta enerhozbere-*

zhennia. Kharkiv : ITE, 2017. № 3. P. 15–20.

12. Bekman U., Hilli P. Teplovoe akumulirovanie enerhii. Moskva : Myr, 1987. 224 p.

13. Rei D., Makmaikl D. Teplovye nasosy. per. z anhl. Moskva : Enerhoizdat, 1982. 224 p.

14. Osoblyvosti suchasnykh system vodianoho opalennia. Kyiv : PDP «Taki spravy», 2003. 176 p. : il.

15. Daffi Dzh., Bekman U. A. Teplovie protsessy s ispolzovaniem solnechnoy enerhii. Moskva : Myr, 1977. 420 p.

16. Liashkov V. I., Kuzmin S. M. Netradycionnye i vozobnovlyaemie istochniki enerhii : uch. posob. Tambov : Izd-vo Tamb. ujc. tekhn. un-ta, 2003. 96 p.

УДК 662.997

Ю. А. Селіхов, канд. техн. наук, професор, К. О. Горбунов, канд. техн. наук, професор,

І. Б. Рябова канд. техн. наук, професор, Е. Р. Нагорний, аспірант,

І. В. Пільник, аспірант, В. Г. Рись, аспірант

ВИМІРЮВАННЯ ТА НАДІЙНІСТЬ ВИРОБНИЦТВА ЕКСЕРГІЇ В ЕНЕРГЕТИЧНІЙ УСТАНОВЦІ

Проблеми енергозбереження нині мають значення у зв'язку з обмеженістю природних ресурсів, нерівномірним їх розподілом, і навіть у зв'язку з зростаючим техногенним забрудненням довкілля, до яких відносяться продукти згоряння традиційних джерел енергії – органічного палива, використовуваного виробництва теплової енергії в котельних установках. Зменшення шкідливого впливу на довкілля досягається використанням нетрадиційних джерел енергії. Був обраний прототип установки і вивчена його робота. Розглянувши роботу прототипу (системи гарячого водопостачання і опалення ко-теджу) енергетичної установки, нами були визначені недоліки в роботі та зроблені висновки. У прототипі енергетичній установці застосовується газовий котел. А в новій енергетичній установці використовується: електричний водонагрівач, геотермальний ґрунтовий тепловий насос "ґрунт-вода" і вітроелектрогенератор.

Представлені результати розрахунків вимірювання та надійності виробництва ексергії – нетто на прикладі енергетичної установки, яка забезпечує приватне домо-водіння електроенергією, гарячим водопостачанням, опаленням та гарячим повітрям у необхідному діапазоні температур для комфортного проживання. За результатами аналізу літературних джерел було підбрано нове за ефективністю устаткування. Розрахунок ефективності заміни старого устаткування на нове проводився відповідно до методики оптимізації за сумою питомих витрат ексергії - нетто. Була розроблена нова принципова технологічна схема енергетичної установки. Спільно з вітроелектрогенератором, електричним водонагрівачем використовується тепловий насос "ґрунт-вода", акумулятори електроенергії та теплоти, що дозволяє: зменшити собівартість теплової енергії за рахунок зниження матеріаломісткості та витрат на обладнання, економити органічне паливо; виробляти електроенергію та надлишок її віддавати в державну електромережу; зменшити теплове навантаження та забруднення навколишнього середовища. Система автоматизації дозволяє керувати комбінованою установкою за допомогою автоматизованого робочого місця без втручання людини цілий рік.

Були розраховані ККД прототипу та нової комбінованої енергетичної установки

та термін окупності нової енергетичної установки.

Ключові слова: вимірювання, надійність, виробництво ексергії, довкілля, оточення системи, різниця потенціалів, інженерна позиція, потоки енергії, потоки речовин, енергетичні баланси, ексергетичний баланс, оцінка придатності, температурний потенціал енергії, газові котли, електричні водонагрівачі, геотермальні, ґрунтові теплові насоси, вітроелектрогенератори, джерела ресурсів, мінеральна сировина, паливо, геотермальні води, сонячне випромінювання, джерела енергії, ексергетичний метод розрахунку, термодинамічні методи розрахунку, акумулювання, акумулятори постійного струму.

Yu. A. Selikhov, K. O. Gorbunov, I. B. Riabova, E. R. Nagorniy, I. V. Pilnyk, V. G. Ris

MEASUREMENT AND RELIABILITY OF ENERGY PRODUCTION IN A POWER PLANT

Energy conservation issues are currently important due to the limited availability of natural resources, their uneven distribution, and also due to the growing man-made pollution of the environment, which includes combustion products of traditional energy sources – organic fuels used to produce thermal energy in boiler plants. Reducing the harmful impact on the environment is achieved by using non-traditional energy sources. A prototype of the installation was selected and its operation was studied. Having studied the operation of the prototype (hot water supply and heating system of the cottage) of the power installation, we identified shortcomings in the operation and made conclusions. The prototype power plant uses a gas boiler. The new power plant uses an electric water heater, a geothermal ground source heat pump and a wind generator. The results of calculations of measurement and reliability of net exergy production are presented using the example of a power plant providing a private home with electricity, hot water, heating and hot air in the required temperature range for comfortable living. Based on the results of the analysis of literary sources, new equipment was selected in terms of efficiency. The calculation of the efficiency of replacing old equipment with new was carried out in accordance with the optimization method based on the sum of specific exergy costs - net. A new basic technological scheme of the power plant was developed. Together with a wind generator and an electric water heater, a ground-to-water heat pump, electric power and heat accumulators are used, which allows: to reduce the cost of thermal energy by reducing material consumption and equipment costs, to save organic fuel; to produce electricity and give its surplus to the state power grid; to reduce the heat load and environmental pollution. The automation system allows the combined plant to be controlled by an automated workstation without human intervention all year round. The efficiency of the prototype and the new combined power plant and the payback period of the new power plant were calculated.

Keywords: measurement, reliability, exergy production, environment, system surroundings, potential difference, engineering position, energy flows, material flows, energy balances, exergetic balance, fitness assessment, energy temperature potential, gas boilers, electric water heaters, geothermal, ground heat pumps, wind power generators, resource sources, mineral raw materials, fuel, geothermal waters, solar radiation, energy sources, exergetic calculation method, thermodynamic calculation methods, storage, direct current batteries.