

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ І ГЛОБАЛЬНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО
ПРОСТОРУ



ВОЛОЩУК ВОЛОДИМИР АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 51-74:536.7

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ НА
ОСНОВІ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПІДХОДІВ**

01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі атомних електричних станцій і інженерної теплофізики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України та в Інституті гідромеханіки НАН України

Науковий консультант: Член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор
Никифорович Євген Іванович,
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бомба Андрій Ярославович,
Рівненський державний гуманітарний університет МОН
України, завідувач кафедри інформатики та прикладної
математики

доктор технічних наук, професор
Мокін Віталій Борисович,
Вінницький національний технічний університет МОН
України, завідувач кафедри системного аналізу,
комп'ютерного моніторингу та інженерної графіки

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Харлампіді Дионіс Харлампійович
Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного
НАН України, провідний науковий співробітник відділу
моделювання та ідентифікації теплових процесів

Захист відбудеться «30» травня 2018 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.255.01 Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України за адресою: 03186, Київ 186, Чоколівський бульвар, 13, ауд. 601.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України за адресою: 03186, Київ 186, Чоколівський бульвар, 13.

Автореферат розісланий «27» квітня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук



О.Г. Лебідь

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Перший етап досліджень об'єктів та систем теплоенергетики за допомогою моделювання ґрунтується на використанні термодинамічних методів. Досить часто ці методи та їх результати відіграють ключову роль під час вибору параметрів і структури системи.

Наступний етап враховує економічні, екологічні та інші критерії. Наявні підходи до проведення таких досліджень передбачають багаторазову реалізацію таких послідовних кроків розрахунку, як термодинаміка, тепломасообмін, гідрогазодинаміка, економіка та екологія, та не в змозі оцінити й поєднати економічні, екологічні та термодинамічні положення з самого початку аналізу, з'ясувати не тільки зовнішні, але і внутрішні, зумовлені термодинамічною недосконалістю елементів теплоенергетичної системи, фактори впливу на економічні та екологічні характеристики.

Сьогодні назріла нагальна потреба у розробленні, удосконаленні та використанні принципово нових методів досліджень у сфері теплоенергетики, які ґрунтуються на сумісному застосуванні Першого та Другого законів термодинаміки, та їх поєднанні із економічним та екологічним оцінюванням – методів прикладної термодинаміки або методів ексергетичного аналізу.

Об'єкти теплоенергетики можна принципово розділити на такі, що працюють за постійних на певному проміжку часу (що характерно для промисловості) й мінливих (що характерно для систем опалення, вентиляції та кондиціонування приміщень будівель) режимів роботи. У другому випадку мінливість режимів роботи як у середині року, так і у багаторічному перерізі зумовлена, передусім, випадковим характером погодно-кліматичних чинників, що, у свою чергу, може суттєво впливати на мінливість і невизначеність відповідних характеристик та критеріїв. За певних умов, як енергетичні, так і ексергетичні характеристики є нелінійними функціями відносно параметрів довкілля, що не завжди дозволяє використовувати як в енергетичному, так і у ексергетичному аналізі стаціонарні підходи, як це часто роблять на практиці.

З огляду на це, актуальною залишається проблема розроблення методології моделювання та оптимізації теплоенергетичних систем, що узагальнює отримані раніше результати і передбачає під час створення й реалізації математичних моделей сумісне застосування Першого та Другого законів термодинаміки. Це, у свою чергу, забезпечить визначення критеріїв, які з позицій єдиного підходу кількісно оцінять необоротності процесів передачі й перетворення енергії та їх зв'язок з економічною та екологічною ефективністю під час вирішення практичних завдань з обґрунтування параметрів та структури систем, зокрема з урахуванням мінливого характеру режимів роботи таких систем, зумовленого впливом погодно-кліматичних факторів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні дослідження теоретичного й прикладного характеру виконувалися відповідно до положень проекту оновленої Енергетичної стратегії України до 2035 року, директив та угод Європейського Союзу і України з інтеграції у сфері енергетики, Закону України «Про енергозбереження», Комплексної державної програми енергозбереження України, Закону України «Про житлово-комунальні послуги»,

Закону України «Про теплопостачання», Закону України «Про енергетичну ефективність будівель», пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки в Україні «Екологічно чиста енергетика та енергозберігаючі технології», Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року. Наукові дослідження та результати, наведені в дисертаційній роботі, тісно пов'язані з планами науково-дослідних робіт кафедри атомних електричних станцій і інженерної теплофізики теплоенергетичного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (КПІ ім. Ігоря Сікорського) та Інституту гідромеханіки Національної академії наук України (НАН України), а також використані у проектах, в яких автор брав безпосередню участь як виконавець, зокрема:

1) «Алюмінієві двофазні теплотранспортні системи з розділенням потоків пари та рідини для енергоефективних технологій» (0117U00428313).

2) Розробка курсів докторської школи «Запровадження навчання третього циклу – докторської програми з відновлювальної енергетики та екотехнологій» (Міжнародний проект Програми «Темпус»).

3) «Дослідження гідродинаміки розчинів та суспензій в трубопровідних системах і пористих середовищах зі змінними властивостями» (0112U000697).

4) «Термодинамічне моделювання конвективних течій в областях зі складною геометрією та їх застосування у нових технологіях енергозбереження та управління теплообмінними процесами» (0114U000348).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності математичного моделювання об'єктів та систем теплоенергетики, включаючи мінливість їх режимів роботи в результаті впливу випадкового характеру погоднокліматичного чинника, на основі сумісного застосування Першого та Другого законів термодинаміки, а також за рахунок відповідного інформаційного забезпечення реалізації моделювання.

Досягнення зазначеної мети забезпечується розв'язанням таких задач:

- аналіз наявної методології створення й реалізації математичних моделей з дослідження об'єктів і систем теплоенергетики, включаючи мінливість їх режимів роботи в результаті впливу випадкового характеру погоднокліматичного чинника та взаємозв'язок між їх складовими, і обґрунтування необхідності подальшого вдосконалення методології та методів моделювання на основі термодинамічних підходів;

- обґрунтування доцільності застосування додаткових критеріїв оцінювання мінливості режимів роботи систем теплозабезпечення будинків для врахування впливу погоднокліматичного фактора;

- розроблення методології, методів та програмна реалізація відповідних алгоритмів дослідження впливу мінливості погоднокліматичного фактора на енергетичні, ексергетичні та економічні характеристики будинку як основного елемента системи теплозабезпечення;

- удосконалення методу та програмна реалізація відповідного алгоритму з комплексного ексергетичного, економічного та екологічного аналізу систем теплозабезпечення будинків з урахуванням мінливого характеру режимів роботи

таких систем через вплив погодно-кліматичного фактора, та взаємозв'язку між їх компонентами;

- удосконалення методу та програмна реалізація алгоритму термодинамічної оптимізації перспективних теплоенергетичних установок на базі газотурбінного та парогазового термодинамічних циклів;

- математичне моделювання об'єктів теплоенергетики завдяки створенню та реалізації із залученням Інтернет-технологій відкритих інтерактивних алгоритмів, «хмарних» ресурсів із визначення теплофізичних властивостей робочих тіл та інших функцій теплоенергетичних процесів;

- тестування, апробація та проведення комп'ютерних експериментів із застосуванням розроблених алгоритмів щодо обґрунтування параметрів та структур об'єктів і систем теплоенергетики, зокрема з урахуванням мінливого характеру режимів роботи.

Об'єкт дослідження – процеси передачі та перетворення енергії в об'єктах та системах теплоенергетики за постійних та мінливих режимів роботи, зумовлених впливом погодно-кліматичного фактора.

Предмет дослідження – методологія та методи математичного моделювання теплоенергетичних систем.

Методи досліджень – моделювання режимів роботи і процесів на теплоенергетичних об'єктах та системах; методи сучасної прикладної термодинаміки, що ґрунтуються на поєднанні ексергетичного аналізу з визначенням економічної вартості продукту та оцінюванням життєвого циклу; методи теорії ймовірностей та математичної статистики для теоретичного обґрунтування й оцінювання критеріїв, що характеризують мінливість режимів роботи й параметрів ухвалення рішень під час створення об'єктів та систем теплоенергетики у змінних погодно-кліматичних умовах.

Наукова новизна одержаних результатів:

вперше:

- розроблено метод із розрахунку потреб ексергії для створення теплового комфорту всередині будинку на основі врахування за допомогою теорії ймовірностей впливу випадкового характеру метеорологічних факторів під час опалювального періоду, що забезпечує можливість застосування ексергетичного оцінювання систем теплозабезпечення будівель з урахуванням змін їх режимів роботи;

- запропоновано метод із розрахунку параметрів природної вентиляції будинку на основі врахування за допомогою теорії ймовірностей випадкового характеру впливу метеорологічних факторів під час опалювального періоду та у багаторічному перерізі, що забезпечує можливість визначення критеріїв обґрунтування впровадження енергоефективних заходів у системі вентиляції будинку з урахуванням змін режимів природної вентиляції;

- розроблено метод із визначення критеріїв обґрунтування параметрів приведенного опору теплопередачі огорожувальної конструкції будівлі у разі диференціації цін на енергоносії, залежно від кількості спожитої енергії на основі врахування за допомогою теорії ймовірностей випадкового характеру впливу метеорологічних факторів у багаторічному перерізі, що дозволяє врахувати

відхилення щорічних критеріїв обґрунтування рішення від розрахованих за умови застосування осереднених у багаторічному перерізі значень метеофакторів;

- на основі моделювання показано та обґрунтовано факт зростання показника мінливості через вплив погодно-кліматичного чинника на режими роботи системи теплозабезпечення у разі впровадження в будівлях заходів з енергоефективності, що, у свою чергу, призводить до зростання невизначеності критеріїв ухвалення техніко-технологічних рішень у цих системах;

- на основі моделювання обґрунтована доцільність застосування динамічних підходів для врахування мінливого і випадкового характеру впливу погодно-кліматичних факторів на технологічний процес із подальшим визначенням сезонних показників та критеріїв у методах поєднання ексергетичного, економічного і екологічного аналізу систем теплозабезпечення будинків;

удосконалено:

- метод комплексного аналізу та обґрунтування параметрів системи теплозабезпечення будинку на базі теплонасосної установки шляхом одночасного застосування ексергетичного, ексергоекономічного та ексергоприродничого оцінювання, що забезпечило реалізацію моделі покращення енергетичної (зростання коефіцієнта трансформації та ексергетичного ККД), економічної (зниження вартості продукту системи) та екологічної (зниження негативного впливу на довкілля під час отримання продукту системи) ефективності системи;

- метод термодинамічної оптимізації газотурбінних та парогазових теплоенергетичних установок, завдяки використанню поняття «зразковий термодинамічний цикл», що забезпечує створення математичних моделей з обґрунтування параметрів та структури таких установок при підвищенні їх внутрішнього ККД;

- метод із визначення теплофізичних властивостей робочих тіл на основі табличних даних за допомогою подвійної сплайнової інтерполяції з урахуванням ліній розривів та зламів функціональних залежностей, що дозволило створити як прямі, так і обернені функції для моделювання теплофізичних властивостей робочих тіл;

дістала подальшого розвитку:

- технологія моделювання теплоенергетичних процесів за рахунок застосування «хмарних» обчислювальних сервісів зі збирання, зберігання, оброблення даних, що забезпечує реалізацію відкритих інтерактивних алгоритмів із числового дослідження систем теплоенергетики та теплофізичних властивостей робочих тіл.

Достовірність отриманих результатів. Обґрунтованість і достовірність наукових положень та висновків, сформульованих у дисертаційній роботі, ґрунтується на використанні фундаментальних законів термодинаміки, методів теорії ймовірностей та математичної статистики та підтверджується результатами моделювання і тестування розроблених методів, методик й алгоритмів і їх порівнянням із наявними даними відомих робіт.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- розроблено алгоритми реалізації запропонованого методу врахування впливу випадкового характеру метеорологічних факторів у випадку визначення:

потреб ексергії для створення теплового комфорту всередині будинку; параметрів природної вентиляції будинку та критеріїв обґрунтування впровадження енергоефективних заходів у системі вентиляції будинку; критеріїв обґрунтування параметрів приведенного опору теплопередачі огорожувальної конструкції будівлі;

- створено алгоритм реалізації математичної моделі комплексного ексергетичного, ексергоекономічного та ексергоприродничого аналізу систем теплозабезпечення будівель на базі теплонасосної установки із застосування динамічного підходу;

- запропоновано алгоритми термодинамічної оптимізації газотурбінних та парогазових теплоенергетичних установок з обґрунтування їх структури та параметрів;

- розроблено відкриті інтерактивні алгоритми з моделювання об'єктів теплоенергетики шляхом створення в мережі Інтернет за допомогою комп'ютерних програм відповідної бази даних;

- створено та реалізовано алгоритм із визначення теплофізичних властивостей робочих тіл на основі удосконаленого методу подвійної сплайнової інтерполяції;

- результати досліджень дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри атомних електричних станцій і інженерної теплофізики КПІ ім. Ігоря Сікорського, а також кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин Національного університету водного господарства та природокористування;

- результати наукової роботи використано під час викладання курсів «Теплонасосні технології», «Теплова ефективність у будівлях», «Інтернет-розрахунки теплового режиму будівель» на Літніх школах Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (серпень, 2012, 2014, 2015 рр.);

- розроблені методики та комп'ютерні програми використано в діяльності корпорації «Європейська енергетична компанія» та ПРАТ «Білоцерківська ТЕЦ» для обґрунтування параметрів систем теплозабезпечення будівель;

- методологічні аспекти ексергетичного підходу, критерії, методи та засоби оцінювання, розроблені в роботі, використано у процесі адаптації та реалізації методології беккастингу (backcasting) із розроблення сценаріїв розвитку систем теплозабезпечення м. Біла Церква в межах реалізації проекту ERAIHM «Поліпшення потенціалу досліджень та співробітництва Інституту гідромеханіки НАН України в Європейському дослідницькому просторі», а також під час створення транснаціональної багатосторонньої платформи для обміну досвідом з управління та розвитку систем енергозабезпечення міст у регіоні Балтійського моря на основі принципів сталого розвитку в межах проекту Шведського інституту ReENERGY «Обмін досвідом зі сталого розвитку систем енергозабезпечення міст країн Балтійського регіону».

Особистий внесок здобувача. На підставі узагальнення результатів теоретичних та експериментальних досліджень автором особисто розроблено і сформульовано основні положення дисертаційної роботи щодо наукових принципів, підходів, методів, критеріїв та засобів з обґрунтування рішень під час створення та

реалізації моделювання об'єктів та систем теплоенергетики, зокрема систем теплозабезпечення будинків, а також газотурбінних та парогазових установок, на основі методології термодинамічного аналізу. Основні результати теоретичних та розрахункових досліджень, що виносяться на захист, отримано самостійно.

У роботах, написаних у співавторстві, які наведено у списку опублікованих праць за темою дисертації, автору належать такі результати:

- створення математичних моделей, розроблення та реалізація відкритих інтерактивних алгоритмів із числового дослідження теплоенергетичних процесів та установок (газотурбінних та парогазових установок, теплових насосів) [1];

- запропоновано принцип створення відкритого Інтернет-середовища для дослідження термодинамічних циклів [4];

- запропоновано підхід, розроблено і реалізовано методика створення відкритих інтерактивних алгоритмів на базі Mathcad Application/Calculation Server для числового дослідження газотурбінної установки [5];

- розроблення «хмарних» функцій з визначення термодинамічних властивостей фреону R407c [6];

- показано необхідність урахування мінливого та невизначеного характеру кліматологічної та прогностичної інформації щодо реалізації метеорологічних режимів у процесі обґрунтування рішень для систем централізованого теплопостачання [8];

- реалізовано наповнення відкритого Інтернет-середовища розрахунковими алгоритмами з дослідження термодинамічних циклів [9];

- створення математичних моделей та реалізація відкритих інтерактивних алгоритмів з дослідження впливу параметрів газотурбінних та парогазових установок на їх ефективність [10];

- створення математичних моделей та реалізація термодинамічної оптимізації зразкового циклу бінарної парогазової установки на основі «хмарних» розрахунків [11];

- розроблення та реалізація відкритих інтерактивних алгоритмів з дослідження та обґрунтування параметрів парогазових установок [12];

- реалізація методологічного підходу з вибору кліматологічно-оптимального опору теплопередачі огороджувальних конструкцій будинків [13];

- створення математичної моделі з реалізації числового дослідження теплонасосної установки у складі системи теплозабезпечення будівель [18];

- запропоновано метод з оцінювання впливу ймовірного характеру погодно-кліматичного фактора на параметри природної вентиляції будівлі [19];

- створення та реалізація математичної моделі з оцінювання можливих схемних рішень щодо використання енергії стічних вод індивідуального будинку для роботи теплонасосної установки [21];

- розроблення та реалізація відкритих інтерактивних алгоритмів з розрахунку теплоенергетичних процесів [23];

- створення математичних моделей та реалізація відкритих інтерактивних алгоритмів з оптимізації параметрів газотурбінних та парогазових установок без урахування змінювання складу робочого тіла в елементах газотурбінної установки [24];

- розроблення математичних моделей та реалізація відкритих інтерактивних алгоритмів з оптимізації параметрів газотурбінних та парогазових установок з урахуванням змінювання складу робочого тіла в елементах газотурбінної установки [25];
- розроблення математичних моделей та реалізація відкритих інтерактивних алгоритмів для моделювання перспективних енергоустановок [26];
- створення математичної моделі із дослідження впливу визначальних метеорологічних параметрів на тепловий режим будівлі [27];
- обґрунтовано доцільність удосконалення на основі ексергетичного підходу методологічної бази щодо прийняття рішень під час утилізації енергії стічних вод в системах теплозабезпечення [30].

Апробація результатів дисертації. Результати наукової роботи доповідались на численних науково-методичних та науково-технічних міжнародних, всеукраїнських і регіональних конференціях й семінарах: на кафедрі промислової екології Королівського технологічного інституту (м. Стокгольм, Швеція, 2011, 2012, 2013 рр.), на Міжнародній конференції з енергетики та внутрішнього мікроклімату для територій з жарким кліматом (м. Доха, 2014 р., Об'єднані Арабські Емірати); на Міжнародній конференції «Power System Engineering, Thermodynamics», (Чехія, 2011, 2012 рр.); на щорічній конференції молодих науковців з питань енергетики CYSENI (м. Каунас, Литва, 2016, 2017 рр.); на IV Міжнародній конференції «Сучасні проблеми теплоенергетики» SPOTE-2016, (14–16 вересня 2016 р., м. Глівіце, Польща); на XXXIII Науково-технічній конференції «Моделювання» (м. Київ, 2014 р., Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАНУ); на Міжнародному науково-практичному форумі «Наука і бізнес – основа розвитку економіки», (м. Дніпропетровськ, 2012 р.); на Всеукраїнській науковій конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів» (м. Рівне, 2013 р., Національний університет водного господарства та природокористування); на Міжнародній конференції «Геометричне і комп'ютерне моделювання: енергозбереження, екологія, дизайн» (м. Сімферополь, 2013 р.); на Всеукраїнських науково-технічній конференціях «Енергозбереження в галузях національного господарства» та «Енергоефективність у галузях економіки України» (м. Вінниця, 2011, 2014, 2015 рр., Вінницький національний технічний університет); на Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми економії енергії» (м. Львів, 2003 р.); на Міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві «Енергоінтеграція» (м. Київ, 2011, 2013 рр., Київський національний університет будівництва і архітектури); на 7-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології» (м. Одеса, 2011 р., Одеська державна академія холоду); на 8-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сталий розвиток та штучний холод» (м. Одеса, 2012 р., Одеська державна академія холоду); на XVI Всеукраїнській науково-технічній конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології» (м. Одеса, 2016 р., Одеська національна академія харчових технологій); на Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергозбереження України та шляхи їх вирішення» (м. Харків, 2010, 2011, 2012, 2014 рр., НТУ «Харківський політехнічний інститут»); на XV Міжнародному

конгресі двигунобудівників (с. Рибаче, 2010 р.); на VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (м. Київ, 1–3 червня 2016 р., НТУУ «КПІ»); на XVII Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», (м. Київ, 29–30 вересня 2016 р., НТУУ «КПІ»); на XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Енергетичні і теплотехнічні процеси та обладнання» (м. Харків, 2017 р., НТУ «Харківський політехнічний інститут»); на IX Міжнародній науково-практичній конференції «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні» (м. Львів, 6–7 квітня 2017 р.). Окремі результати представлялися на Всеукраїнському конкурсі «Молодь – енергетиці України» (2009, 2010, 2011 рр.). Представлені до конкурсу роботи здобули призові місця.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 47 наукових праць, у тому числі 1 монографія, 25 статей у наукових фахових виданнях (із них 9 статей у періодичних виданнях іноземних держав, 3 у періодичних виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз), 4 статті в інших виданнях, 17 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'ятьох розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 260 найменувань, 5 додатків. Повний обсяг дисертації становить 371 сторінку. Основний текст викладено на 297 сторінках. Робота містить 120 рисунків і 19 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, показано її зв'язок із науковими програмами КПІ ім. Ігоря Сікорського та Інституту гідромеханіки НАН України, сформульовано мету й завдання досліджень, подано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, відображено особистий внесок автора, надано відомості про апробацію результатів роботи, публікації, структуру та обсяг дисертації.

Перший розділ дисертації присвячено аналізу сучасного стану та шляхів подальшого розв'язання науково-прикладної проблеми з удосконалення на основі термодинамічних підходів методології створення та реалізації математичних моделей з дослідження об'єктів та систем теплоенергетики, включаючи мінливість режимів роботи таких систем, що зумовлена випадковим характером впливу погодно-кліматичного чинника.

В теперішній час все частіше для різних типів систем передачі та перетворення енергії, а особливо тих, де використовується передача енергії у формі теплоти, застосовують методи термодинамічного аналізу. Термодинаміка ґрунтується на трьох фундаментальних законах (Перший і Другий з яких є найбільш значущими). Перший закон визначає принцип збереження кількості енергії. Другий стверджує, що енергія, крім кількості, характеризується також якістю, і процеси, що відбуваються у природі, самовільно знижують цю якість. Необхідність кількісного оцінювання якості енергії зумовила введення таких понять як ентропія та ексергія. У подальшому почали розвиватися методи поєднання ексергетичного аналізу з економічним та екологічним оцінюванням.

На відміну від енергетичного підходу, методологія ексергетичного аналізу забезпечує науково обґрунтовану теорію вибору параметрів, режимів та структури теплоенергетичного об'єкта чи системи відповідно до прийнятих критеріїв та умов.

Наявна методологія, що ґрунтується на техніко-економічному аналізі рішень у сфері теплоенергетики і передбачає багаторазову реалізацію таких послідовних кроків розрахунку, як термодинаміка, тепломасообмін, гідрогазодинаміка, економіка та екологія, не в змозі оцінити і поєднати економічні, екологічні й термодинамічні положення з самого початку аналізу, з'ясувати не тільки зовнішні, але і внутрішні, зумовлені термодинамічною недосконалістю елементів системи, фактори впливу на економічні та екологічні характеристики.

Ексергетичний підхід є новим витком у теорії моделювання об'єктів та систем теплоенергетики, зокрема систем тепло- та холодозабезпечення будівель. На відміну від енергетичного аналізу, який найчастіше використовується у науковій та інженерній практиці, поєднання ексергетичного, економічного та екологічного методів оцінювання дозволяє визначити місце, значення, джерела, вартість і негативний вплив на довкілля термодинамічних втрат у процесах передачі та перетворення енергії.

Наявні в інженерній та науковій практиці системи коефіцієнтів, що характеризують ступінь досконалості енергетичних процесів і ґрунтуються на Першому законі термодинаміки, не забезпечують дослідника достатньою та об'єктивною інформацією для ефективного вдосконалення систем передачі та перетворення енергії, не дозволяють оцінити втрату якості або потенціалу енергоресурсів на кожному етапі передачі та перетворення енергії, а за певних умов можуть і дезорієнтувати дослідника.

Подана робота ґрунтується на фундаментальних розробках методів термодинамічного аналізу, які було закладено під час зародження технічної термодинаміки (*С. Карно, Р. Клаузіус, Дж.В. Гіббс, Г. Гюї, А. Стодола*), та успішно розвиваються впродовж ХХ та ХХІ ст. (*Я. Шаргут, А. І. Андрющенко, В. М. Бродяньський, З. Рант, Д. П. Гохштейн, В. С. Мартиновський, Є. І. Янтовський, Т. Морозюк, Д. Х. Харлампіди, М. Tribus, R. B. Evans, E. F. Obert, R. A. Gaggioli, Y. M. EL-Sayed, A. Bejan, G. Tsatsaronis, A. Valero, C. A. Frangopoulos, M. R. Von Spakovsky, G. Wall, E. Sciubba, I. Dinser, M. A. Rosen, T. Kotas, D. Schmidt, M. Shukuya, A. Hepbasli та інші*).

Наявні технології теплозабезпечення будівель загалом базуються на використанні джерел енергії з високим значенням ексергії (якості) за рахунок спалювання різних видів палива при температурі 1500...2000 °С. Водночас безпосередньо у будівлях для створення теплового комфорту потрібна енергія з порівняно низькою ексергією (якістю), що відповідає температурному рівню 18...20 °С. У результаті цього значна частина високоякісної енергії, яку не можна замінити в інших технологічних процесах (хімічна промисловість, металургія тощо), втрачається.

На відміну від електрогенеруючих установок та систем промислової теплоенергетики, де методи прикладної термодинаміки апробовано найбільшою мірою, значна частина елементів систем теплозабезпечення будівель характеризується параметрами, близькими за своїми значеннями до параметрів

оточуючого середовища (температура, відносна вологість, тиск), відносно яких визначаються ексергетичні показники. Це обумовлює чутливість цих показників до змінювання параметрів зовнішнього повітря. Загалом, у наявних роботах, ексергетичний аналіз систем створення теплового комфорту в будівлях здійснюють за умови незмінних, розрахункових значень параметрів навколишнього середовища. У деяких враховують динаміку змінювання цих параметрів у межах одного року, хоча параметри зовнішнього середовища змінюються як у середині року, так і в багаторічному перерізі.

На основі огляду сучасних методів прикладної термодинаміки обґрунтовано доцільність використання в аналізі систем теплозабезпечення будівель понять ексергія «палива», ексергія «продукту», «деструкція ексергії» (див. табл. 1).

Комплексний ексергетичний, економічний та екологічний (на основі оцінювання життєвого циклу) аналіз запропоновано реалізувати на основі алгебраїчного підходу із використанням методу питомої ексергетичної вартості та негативного впливу на довкілля (SPECO-метод). Це обґрунтовано тим, що алгебраїчні методи (або методи ексергоекономічного та ексергоприродничого обліку) не мають обмежень щодо типу і складності системи, їх можна ефективно застосовувати на стадії створення й оптимізації нової або модернізації наявної системи.

Таблиця 1. Рівняння та критерії з реалізації ексергетичного, ексергоекономічного та ексергоприродничого аналізу

Ексергетичний аналіз	Ексергоекономічний аналіз (<i>exergoeconomic analysis</i>)	Ексергоприродничий аналіз (<i>exergoenvironmental analysis</i>)
1	2	3
<p>Ексергетичний баланс усієї системи</p> $\dot{E}_{F,tot} = \dot{E}_{P,tot} + \sum_k \dot{E}_{D,k} + \dot{E}_{L,tot}$ <p>де $\dot{E}_{F,tot}$, $\dot{E}_{P,tot}$ – відповідно ексергія «палива» та «продукту» системи в цілому; $\dot{E}_{D,k}$ – деструкція ексергії у k-му компоненті; $\dot{E}_{L,tot}$ – втрати ексергії (потік ексергії у навколишнє середовище).</p>	<p>Балансове рівняння вартості</p> $c_{P,k} \dot{E}_{P,k} = c_{F,k} \dot{E}_{F,k} + \dot{Z}_k$ <p>\dot{Z}_k – сумарна вартість капітальних затрат, витрат на обслуговування (не враховуючи затрат на паливо) та ремонт; $c_{P,k}$ та $c_{F,k}$ – відповідно питома вартість ексергії «палива» та «продукту»; $\dot{E}_{P,k}$ та $\dot{E}_{F,k}$ – відповідно ексергія «палива» та «продукту» k-го компонента.</p>	<p>Балансове рівняння впливу на довкілля</p> $b_{P,k} \dot{E}_{P,k} = b_{F,k} \dot{E}_{F,k} + \dot{Y}_k$ <p>\dot{Y}_k – сумарний вплив k-го компонента на довкілля на стадіях виробництва, експлуатації та утилізації; $b_{P,k}$ та $b_{F,k}$ – відповідно питомий вплив на довкілля ексергії «палива» та «продукту».</p>

1	2	3
<p>Ексергетичний баланс для k-го компонента</p> $\dot{E}_{F,k} = \dot{E}_{P,k} + \dot{E}_{D,k},$ <p>$\dot{E}_{F,k}$, $\dot{E}_{P,k}$ – відповідно ексергія «палива» та «продукту» у k-му компоненті.</p>	<p>Питома вартість ексергії «палива»</p> $c_{F,k} = \frac{\dot{C}_{F,k}}{\dot{E}_{F,k}}.$	<p>Питомий вплив на довкілля ексергії «палива»</p> $b_{F,k} = \frac{\dot{B}_{F,k}}{\dot{E}_{F,k}}.$
<p>Деструкція ексергії у k-му компоненті</p> $\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{F,k} - \dot{E}_{P,k}$ <p>або</p> $\dot{E}_{D,k} = T_0 \dot{m}_k s_{gen,k}$	<p>Питома вартість ексергії «продукту»</p> $c_{P,k} = \frac{\dot{C}_{P,k}}{\dot{E}_{P,k}}.$	<p>Питомий вплив на довкілля ексергії «продукту»</p> $b_{P,k} = \frac{\dot{B}_{P,k}}{\dot{E}_{P,k}}.$
<p>Ексергетична ефективність усієї системи</p> $\varepsilon_{tot} = \frac{\dot{E}_{P,tot}}{\dot{E}_{F,tot}}.$	<p>Вартість, пов'язана з деструкцією ексергії</p> $\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \dot{E}_{D,k}.$	<p>Вплив на довкілля через деструкцію ексергії</p> $\dot{B}_{D,k} = b_{F,k} \dot{E}_{D,k}.$
<p>Ексергетичний ККД k-го компонента</p> $\varepsilon_k = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k}}.$	<p>Сумарна вартість капітальних затрат (\dot{Z}_k^{CI}), витрат на обслуговування (не враховуючи затрат на паливо) та ремонт (\dot{Z}_k^{OM})</p> $\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM}.$	<p>Сумарний вплив k-го компонента на довкілля на стадіях виробництва (\dot{Y}_k^{CO}), експлуатації (\dot{Y}_k^{OM}) та утилізації (\dot{Y}_k^{DI})</p> $\dot{Y}_k = \dot{Y}_k^{CO} + \dot{Y}_k^{OM} + \dot{Y}_k^{DI}.$
	<p>Відносна зміна ціни ексергії «продукту» та ексергії «палива»</p> $r_k = \frac{c_{P,k} - c_{F,k}}{c_{F,k}}.$	<p>Відносна зміна впливу на довкілля</p> $r_{b,k} = \frac{b_{P,k} - b_{F,k}}{b_{F,k}}.$
	<p>Ексергоекономічний фактор</p> $f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + c_{F,k} \dot{E}_{D,k}}.$	<p>Ексергоприродничий фактор</p> $f_{b,k} = \frac{\dot{Y}_k}{\dot{Y}_k + b_{F,k} \dot{E}_{D,k}}.$
	<p>Сумарні затрати</p> $\dot{Z}_k + c_{F,k} \dot{E}_{D,k}$	<p>Сумарний негативний вплив на довкілля</p> $\dot{Y}_k + b_{F,k} \dot{E}_{D,k}$

Перспективний напрям розвитку енергетики пов'язаний із газотурбінними та парогазовими енергетичними установками. Шляхи підвищення ефективності таких установок до кінця ще не досліджено і становлять складну багатопараметричну

проблему, яку в багатьох випадках можна вирішити за допомогою моделювання. Зокрема термодинамічна оптимізація параметрів та структури таких об'єктів, яку можна реалізувати лише за допомогою відповідних математичних та комп'ютерних моделей, має важливе, а то і вирішальне значення в реалізації наступних етапів з обґрунтування проектних рішень щодо цих об'єктів.

Однією з основних перешкод широкого впровадження на практиці сучасних методів реалізації математичних моделей об'єктів теплоенергетики на основі термодинамічних підходів є необхідність залучення бази даних із теплофізичних властивостей робочих тіл та застосування досить нестандартної теорії моделювання, що переважно не використовують в інженерній діяльності, оскільки це вимагає додатковий час та зусилля і не завжди можна реалізувати за допомогою наявних програмних продуктів. З огляду на це в роботі поставлено задачу розроблення та реалізації нових методів організації процесів моделювання, які забезпечили б практичне впровадження розрахункових моделей на основі термодинамічних підходів, були легкодоступними, зручними та спиралися на сучасні інформаційні технології та Інтернет.

У другому розділі дисертації наведено методологічні підходи до реалізації математичних моделей з енергетичного та ексергетичного аналізу будівлі як ключового елемента систем теплозабезпечення будівель з урахуванням змінних режимів роботи, зумовлених випадковим характером погодно-кліматичного чинника.

Нехай Ω_D є множина погодно-кліматичних умов $\Omega_D = \{D\}$ та множина дій з боку будівлі як системи створення теплового комфорту в приміщенні $\Omega_R = \{R\}$. Маючи дані про характер множин Ω_D та Ω_R , можна створити функцію

$$u = u(D, R), \quad (1)$$

яка визначає ефект у разі ухвалення деякого рішення $R \in \Omega_R$ і здійснення погодних умов $D \in \Omega_D$.

Запропоновано оптимально використати наявну кліматологічну інформацію на основі застосування методу теорії ймовірностей, який передбачає ухвалення такого рішення R_j , за якого середнє у статистичному сенсі значення функції

$$\bar{U} = \int_{\langle x \rangle} u(x, R_j) f(x) dx \quad (2)$$

досягає екстремального значення або задовольняє відповідній умові. В формулі (2) через $f(x)$ позначено закон розподілу метеофактора (або комплексу метеофакторів), що характеризує особливості клімату території розміщення об'єкта.

Вирішуючи завдання щодо підвищення рівня стійкості або оцінювання невизначеності ухваленого рішення, з урахуванням мінливого характеру метеорологічних факторів впливу, запропоновано використовувати критерій, який комплексно враховує як дисперсію результатів, так і їх середній рівень, тобто коефіцієнт варіації або мінливості

$$CV = \frac{\sigma}{U}, \quad (3)$$

де \bar{U} – значення параметра чи критерію, розрахованого за формулою (2); σ – середнє квадратичне відхилення вибраного параметра чи критерію ухваленного рішення.

Варто відзначити, що застосування вищенаведеного методу доцільно, якщо функція (1) є нелінійною відносно параметра D або різною у різних діапазонах множини Ω_D .

У розділі було поставлено задачу – оцінити вплив мінливості погоднокліматичного фактора, як у середині опалювального сезону, так і в багаторічному перерізі, з урахуванням наявних тенденцій інженерно-архітектурних рішень у будівлях на характер змінювання не лише енергетичних, але і ексергетичних характеристик. Під час створення та реалізації математичних моделей було використано квазістаціонарний підхід для добового проміжку часу $\tau_n = 24$ год.

Для прикладу, на рис. 1 та 2 показано графіки змінювання у багаторічному перерізі потреб енергії та ексергії для теплозабезпечення триповерхового будинку загальною опалювальною площею 300 м^2 із низькими та підвищеними теплотехнічними характеристиками, які можна на сьогодні технічно реалізувати. При цьому вісь абсцис показує відносне відхилення річних потреб відповідного показника $Y_{X_j}^{year}$ від його осередненого у багаторічному перерізі значення $Y_{X_{aver}}^{year}$.

Як бачимо з наведених даних, із підвищенням теплотехнічних характеристик будинку зростає мінливість річних потреб у енергії Q_{dem}^{year} та ексергії E_{dem}^{year} . За низьких теплотехнічних характеристик будинку сумарні за опалювальний період потреби енергії в окремі роки $Q_{dem,j}^{year}$ відрізняються від їх осередненого в багаторічному перерізі значення $Q_{dem,aver}^{year}$ на 25 % (рис. 1, а). Натомість за підвищених теплотехнічних характеристик це відхилення вже становить 45 % (рис. 1, б). Мінливість потреб ексергії у багаторічному перерізі зростає порівняно з мінливістю потреб енергії. Це зумовлено тим, що потреби ексергії мають нелінійну (квадратичну) залежність від одного з основних факторів – температури зовнішнього повітря, що визначає цю мінливість або невизначеність. Так за низьких теплотехнічних характеристиках будинку відхилення сумарних за опалювальний період потреб ексергії за окремі роки $E_{dem,j}^{year}$ від їх осередненого в багаторічному перерізі значення $E_{dem,aver}^{year}$ становить 55 % (рис. 2, а). Якщо теплотехнічні характеристики будинку підвищити, то згідно з результатами досліджень, ці відхилення зростають уже до 80 % (рис. 2, б).

Як показав додатковий аналіз, із підвищенням теплотехнічних характеристик будинку зростання мінливості як потреб енергії, так і ексергії зумовлено збільшенням частки прихідної частини енергетичного балансу будинку – за рахунок надходження сонячної радіації та внутрішніх тепловиділень. При цьому для запропонованих у дослідженнях характеристик будинку коефіцієнт мінливості (формула (3)) потреб енергії всередині сезону зростає від 0,44...0,65 до 0,62...0,90, а потреб ексергії – від 0,60...1,00 до 0,79...1,22. Коефіцієнт мінливості сезонних потреб енергії збільшується від 0,115 до 0,190, а сезонних потреб ексергії – від 0,224

до 0,304. Зростання мінливості як потреб енергії, так і потреб ексергії із підвищенням теплотехнічних характеристик будинку обумовлює зростання невизначеності критеріїв ухвалення техніко-технологічних рішень у цих системах.

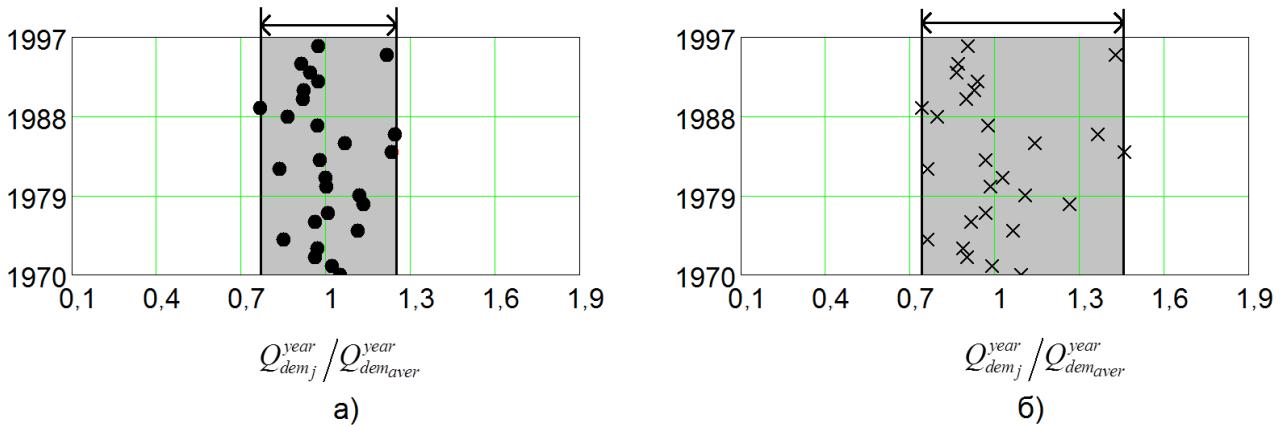


Рис. 1. Змінювання у багаторічному перерізі потреб енергії для теплозабезпечення будинку: а – з низькими теплотехнічними характеристиками; б – з підвищеними характеристиками

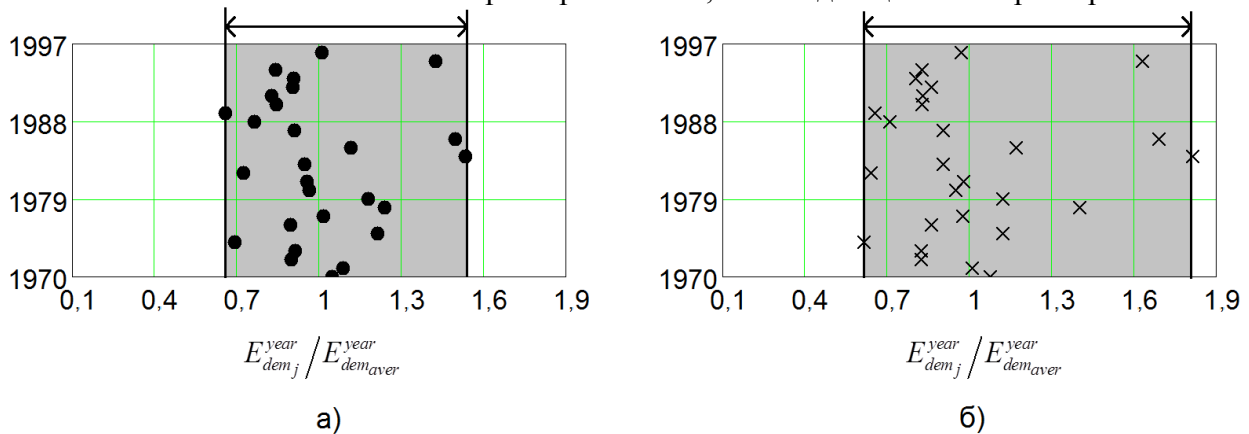


Рис. 2. Змінювання у багаторічному перерізі потреб ексергії для теплозабезпечення будинку: а – з низькими теплотехнічними характеристиками; б – з підвищеними характеристиками

Окремою задачею на сьогодні день є вибір методу визначення ексергетичних характеристик (зокрема, потреб ексергії) у системі теплозабезпечення будинку (динамічного чи стаціонарного), а також обґрунтування параметрів довкілля, відносно яких можна здійснювати ексергетичне оцінювання.

Для будинків із порівняно низькими теплотехнічними характеристиками потреби енергії на створення сприятливого теплового комфорту в холодний період року виражаються лінійною функцією відносно різниці температур внутрішнього, T_{in} , та зовнішнього повітря, $\Delta T(\tau_n)$

$$Q_{dem}(\Delta T(\tau_n)) = k \cdot \Delta T(\tau_n) + b, \quad (4)$$

де k та b – коефіцієнти.

Тоді потреби ексергії для теплозабезпечення будинку на проміжку часу τ_n можна виразити квадратичною функцією відносно різниці температур $\Delta T(\tau_n)$

$$E_{dem}(\Delta T(\tau_n)) = (k \cdot \Delta T(\tau_n) + b) \cdot \left(\frac{\Delta T(\tau_n)}{T_{in}} \right) = \frac{k}{T_{in}} \cdot \Delta T^2(\tau_n) + \frac{b}{T_{in}} \cdot \Delta T(\tau_n). \quad (5)$$

Різниця температур ΔT є випадковою величиною, яку можна формалізувати за допомогою теорії ймовірностей та математичної статистики. Тоді, дотримуючись

динамічного підходу, сумарні за опалювальний період потреби ексергії $E_{dem}^{dyn,year}$ для створення теплового комфорту всередині будинку можна визначити за формулою

$$E_{dem}^{dyn,year} = \int_{\Delta T_{min}}^{\Delta T_{max}} E_{dem}(\Delta T) \cdot f(\Delta T) d\Delta T, \quad (6)$$

де $f(\Delta T)$ – закон розподілу різниці температур як випадкової величини, який буде тим самим, що і для функціонально пов'язаної потреби ексергії; ΔT_{min} , ΔT_{max} – відповідно мінімальне та максимальне значення різниці температур у межах опалювального періоду, К.

Відповідно до стаціонарного підходу сумарні за опалювальний період потреби ексергії $E_{dem}^{steady,year}$ визначаються за формулою

$$E_{dem}^{steady,year} = E_{dem}(\Delta T_{aver}) = E_{dem} \left[\int_{\Delta T_{min}}^{\Delta T_{max}} \Delta T \cdot f(\Delta T) d\Delta T \right], \quad (7)$$

де ΔT_{aver} – осереднене за опалювальний період значення різниці температур внутрішнього та зовнішнього повітря, К.

Вважаючи, що функція розподілу різниці температур $\Delta T(\tau_n)$ визначається кривою розподілу Пірсона I типу (що зумовлено специфікою ряду $\Delta T(\tau_n)$ через обмеження максимально можливого значення $\Delta T(\tau_n)=10$ К), теоретично визначено, що сумарні за опалювальний період потреби ексергії $E_{dem}^{steady,year}$, розраховані за стаціонарним підходом, є на 15 % меншими за потреби ексергії $E_{dem}^{dyn,year}$, обчислені за динамічним підходом. Якщо вважати, що функція розподілу різниці температур $\Delta T(\tau_n)$ визначається нормальним законом, то отримаємо 19-відсоткове відхилення (у меншій бік) стаціонарного методу від динамічного.

Відхилення потреби ексергії за стаціонарним підходом від потреб ексергії за динамічним підходом для теплозабезпечення будинку також було оцінено статистичним опрацюванням даних, результати якого наведено на рис. 3. Бачимо, що для всіх років сумарні за опалювальний період потреби ексергії $E_{dem}^{steady,year}$, розраховані за стаціонарним підходом, є меншими за потреби ексергії $E_{dem}^{dyn,year}$, обчислені за динамічним підходом, причому ця різниця змінюється для різних років від 12 до 28 %.

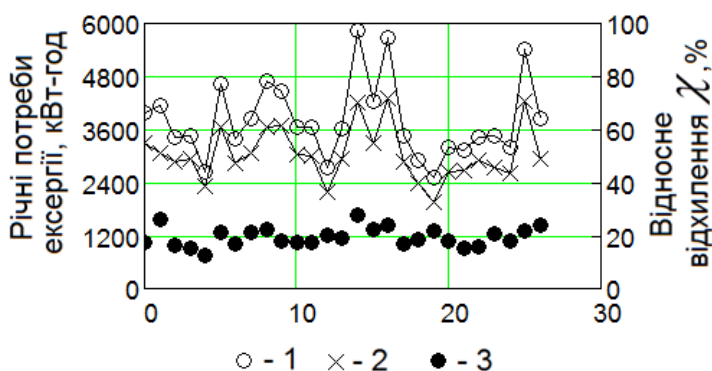


Рис. 3. Річні статистичні значення потреб ексергії, визначених за стаціонарним та динамічним підходами, та їх відносне відхилення:
 1 – потреби ексергії $E_{dem}^{dyn,year}$, розраховані за динамічним підходом;
 2 – потреби ексергії $E_{dem}^{steady,year}$, розраховані за стаціонарним підходом;
 3 – відносне відхилення χ

Витрати енергії на нагрівання вентиляційного/інфільтраційного повітря становлять досить суттєву частку в загальному енергетичному балансі будівлі. При цьому повністю не вирішеними поки що залишаються питання методології розрахунку параметрів та характеристик систем вентиляції. Наявні підходи з визначення витрат енергії на нагрівання вентиляційного повітря у системах природної вентиляції не враховують того, що характер залежності цих витрат є нелінійним відносно метеорологічних параметрів, які, у свою чергу, змінюються випадковим чином. В нормативній літературі дані витрати за весь опалювальний період пропонують визначати теж за стаціонарним підходом.

Отже, для природної вентиляції кратність повітрообміну визначають за формулою

$$ACH = \frac{\dot{V}_{inf}}{V_h} = \frac{k_{inf} \cdot (k_{stack} \Delta T + k_{wind} w^2)^{n_{inf}}}{V_h}, \quad (8)$$

де V_h – опалюваний об'єм будинку, м^3 ; \dot{V}_{inf} – об'ємна витрата зовнішнього повітря, що інфільтрує в середину будинку, $\text{м}^3/\text{год}$; k_{inf} , k_{stack} , k_{wind} – емпіричні коефіцієнти, значення яких взято з довідника американської асоціації інженерів з опалення вентиляції та кондиціонування (ASHRAE Handbook of Fundamentals, 2013) і залежать вони від конструктивних характеристик будинку та мають розмірність $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{Па}^{n_{inf}})$, $\text{Па}/\text{К}$ та $\text{Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$ відповідно; ΔT , w – відповідно різниця температур внутрішнього і зовнішнього повітря та швидкість вітру, К , $\text{м}/\text{с}$; $n_{inf} = 0,5 \dots 1,0$ – коефіцієнт, який залежить від режиму інфільтрації, найчастіше його значення приймають рівним $n_{inf} = 0,67$, яке отримане на основі експериментальних даних численних досліджень інших авторів.

Тоді витрату енергії на нагрівання інфільтраційного повітря визначаємо за формулою

$$\dot{E}n_{inf} = c \cdot k_{inf} \cdot (k_{stack} \Delta T + k_{wind} w^2)^{n_{inf}} \cdot \nu_v \cdot \gamma_0 \cdot \eta \cdot \Delta T, \quad (9)$$

де c – питома теплоємність повітря, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; ν_v – коефіцієнт зниження об'єму повітря у будинку, який враховує наявність внутрішніх огорожувальних конструкцій; γ_0 – густина повітря, що надходить до приміщення за рахунок інфільтрації або вентиляції, $\text{кг}/\text{м}^3$; η – коефіцієнт впливу зустрічного теплового потоку в огорожувальних конструкціях, що приймається залежно від конструктивних параметрів огорожень.

Отже, бачимо, що і кратність повітрообміну ACH , і витрата енергії на нагрівання інфільтраційного повітря $\dot{E}n_{inf}$ є нелінійними функціями відносно різниці температур та швидкості вітру, які є змінними в часі. Якщо прийняти, що вказані аргументи є випадковими величинами, то визначення розрахункових значень цих двох параметрів природної вентиляції для певного періоду часу за спрощеною формулою (аналогічно формулі (7)), яку використовують на практиці (стаціонарний підхід), буде неточним порівняно з дійсними значеннями, які можна обчислити за формулою аналогічній (6), де враховано динаміки змінювання впродовж

опалювального сезону метеорологічних характеристик та залежної від них функції (динамічний підхід).

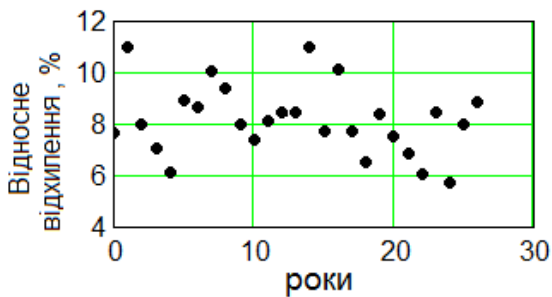


Рис. 4. Відхилення сезонних за опалювальний період значень витрати енергії на нагрівання інфільтраційного повітря, обчислених за стаціонарним підходом у порівнянні із динамічним

На основі статистичного опрацювання бази метеорологічних даних для умов Рівненського регіону за 27 років (1970–1997 рр.) було проаналізовано відхилення значень сумарного за опалювальний період споживання енергії на нагрівання інфільтраційного повітря, визначеного без урахування мінливості метеорологічних факторів (різниці температур внутрішнього і зовнішнього повітря та швидкості вітру), як це роблять на практиці, від значень споживання енергії, але визначеного з урахуванням

мінливості метеорологічних факторів. Результати досліджень наведено на рис. 4 при значенні показника $n_{inf} = 0,67$. З рис. 4 бачимо, що значення сумарного за опалювальний період споживання енергії на нагрівання інфільтраційного повітря, визначеного за стаціонарним підходом, що використовують в інженерній практиці, є на 6...11 % нижчими за значення цього показника, але розрахованого за динамічним підходом. Випадковий характер змін температури та швидкості зовнішнього повітря в умовах Рівненського регіону призводить до невизначеності дисконтованого терміну окупності у випадку заміни природної вентиляції механічною (коливання цього критерію становить 4...7 років і більше). Грошовий потік, визначений на основі середніх за опалювальний період значень температури та швидкості зовнішнього повітря (стаціонарний підхід) є заниженим.

Також на основі запропонованого методу, що враховує ймовірнісний характер мінливості погодно-кліматичного чинника та складну функціональну залежність від цього чинника критерію вибору рішення, запропоновано розв'язання задачі оцінювання впливу цієї мінливості у багаторічному перерізі на значення критеріїв вибору приведенного опору теплопередачі огорожувальної конструкції будинку та їх невизначеність у разі диференціації цін на енергоносії залежно від кількості спожитої енергії. Проведені за цим підходом розрахунки економічних критеріїв показали можливість їх суттєвого відхилення (до 30 %) від критеріїв, розрахованих наявним стаціонарним підходом, де параметри метеофакторів (кількість градусоднів) приймаються постійними, і рівним розрахунковим, осередненим у багаторічному перерізі, значенням. Окрім того, під час розв'язання цієї задачі показано, що, внаслідок мінливості погодно-кліматичного фактора, можлива суттєва мінливість дисконтованого терміну окупності в межах 4,5...8 років.

У **третьому розділі** запропоновано методи та реалізація математичних моделей з поєднання ексергетичного, ексергоекономічного, ексергоприродничого аналізу системи теплозабезпечення будівель на базі теплонасосних установок (ТНУ), як найбільш перспективних технологій у цій сфері, з урахуванням мінливих режимів роботи.

Підвищення ефективності таких систем теплозабезпечення можливе за рахунок відповідного обґрунтування параметрів і типу технологічної схеми «ТНУ-пікове джерело-опалювальний прилад-будинок». На цій ділянці простежується взаємний вплив елементів на загальну ефективність системи. Саме цей взаємозв'язок і запропоновано проаналізувати в цьому розділі за допомогою методів прикладної термодинаміки.

Моделювання реалізовано на основі рівнянь масового, енергетичного, ексергетичного балансів контрольних об'ємів (для окремих елементів системи), рівнянь теплопередачі, а також емпіричних та напівемпіричних залежностей, що описують теплоенергетичні процеси в елементах системи:

$$\frac{dm_{cv,k}}{d\tau} = \sum_{in} \dot{m}_{in,k} - \sum_{out} \dot{m}_{out,k}; \quad (10)$$

$$\frac{dEn_{cv,k}}{d\tau} = \sum_j \dot{Q}_{j,k} - \dot{W}_{cv,k} + \sum_{in} \dot{m}_{in,k} h_{i,k} - \sum_{out} \dot{m}_{out,k} h_{e,k}; \quad (11)$$

$$\frac{dE_{cv,k}}{d\tau} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_{j,k}}\right) \dot{Q}_{j,k} - \left(\dot{W}_{cv,k} - p_0 \frac{dV_{cv,k}}{d\tau}\right) + \sum_{in} \dot{m}_{in,k} e_{in,k} - \sum_{out} \dot{m}_{out,k} e_{out,k} - \dot{E}_{D,k}; \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{j,k} = k_j \cdot F_{k,j} \cdot \Delta T_j, \quad (13)$$

де $\frac{dm_{cv,k}}{d\tau}$, $\frac{dEn_{cv,k}}{d\tau}$, $\frac{dE_{cv,k}}{d\tau}$, $\frac{dV_{cv,k}}{d\tau}$ – відповідно швидкості зміни маси, енергії, ексергії та об'єму в момент часу τ k -го контрольного об'єму; $\dot{m}_{in,k}$, $\dot{m}_{out,k}$ – відповідно масові витрати вхідного (*in*) та вихідного (*out*) потоку для k -го контрольного об'єму, кг/с; $\dot{Q}_{j,k}$, $\dot{W}_{cv,k}$, $\dot{m}_{in,k} h_{in,k}$, $\dot{m}_{out,k} h_{out,k}$ – відповідно потоки енергії, що передаються у формі теплоти, технічної роботи і потоком речовини через контрольну поверхню k -го контрольного об'єму, Вт; $\left(1 - \frac{T_0}{T_{j,k}}\right) \dot{Q}_{j,k}$, $\dot{W}_{cv,k}$, $\dot{m}_{in,k} e_{in,k}$, $\dot{m}_{out,k} e_{out,k}$ – відповідно потоки ексергії теплоти, технічної роботи та потоку речовини через контрольну поверхню k -го контрольного об'єму, Вт; $T_{j,k}$ – температурний рівень на j -й частині контрольної поверхні k -го контрольного об'єму, К; p_0 – абсолютний тиск навколишнього природного середовища, Па; $h_{in,k}$, $e_{in,k}$, $h_{out,k}$, $e_{out,k}$ – відповідно питома ентальпія та ексергія вхідного (*in*) та вихідного (*out*) потоку речовини для k -го контрольного об'єму, Дж/кг; k_j – коефіцієнт теплопередачі потоку теплоти $\dot{Q}_{j,k}$ через j -ту частину контрольної поверхні k -го контрольного об'єму, Вт/(м²·К); $F_{k,j}$ – площа теплопередачі потоку теплоти $\dot{Q}_{j,k}$ через j -ту частину контрольної поверхні k -го контрольного об'єму, м²; ΔT_j – температурний напір при передачі потоку теплоти $\dot{Q}_{j,k}$ через j -ту частину контрольної поверхні k -го контрольного об'єму, К.

Прийнято, що тривалість перехідних процесів є значно меншою порівняно з динамікою змінювання режиму роботи системи. Тоді $\frac{dm_{cv,k}}{d\tau} = 0$, $\frac{dEn_{cv,k}}{d\tau} = 0$, $\frac{dE_{cv,k}}{d\tau} = 0$, $\frac{dV_{cv,k}}{d\tau} = 0$, а саму динаміку режимів роботи системи запропоновано реалізувати на основі квазістаціонарного підходу із часовим кроком $\tau_n = 24$ год. У результаті цього математичне моделювання необоротних процесів теплозабезпечення будинку на базі ТНУ ґрунтується на реалізації алгоритму розв'язання системи алгебраїчних рівнянь. Загалом розроблена математична модель ТНУ складається із системи більше 30-ти алгебраїчних рівнянь (див. табл. 2).

Для прикладу, на рис. 5 наведено результати математичного моделювання системи з розрахунку сумарних за опалювальний період (для позначення використано верхній індекс *year*) значень деструкції ексергії $E_{D,k}^{year}$ в елементах ТНУ типу «повітря-вода», піковому нагрівнику (P) та опалювальному приладі (HS). Як бачимо, найбільша сезонна деструкція ексергії характерна для ТНУ і становить 5254 кВт·год, а найменша – для пікового нагрівника і дорівнює 390 кВт·год. Сумарна за опалювальний період деструкція ексергії в HS становить 1514 кВт·год, тобто менше ніж у ТНУ на 72 %. Якщо проаналізувати більш детально ТНУ, то, як видно із рис. 5, сумарні за опалювальний період значення деструкції ексергії становлять відповідно: у компресорі – 1752 кВт·год, у дросельному вентилі – 1632 кВт·год, у випарнику – 1144 кВт·год, у конденсаторі – 726 кВт·год. Порівняно з компресором та дросельним вентилям деструкція ексергії у випарнику та конденсаторі є на 30...65 % меншою.

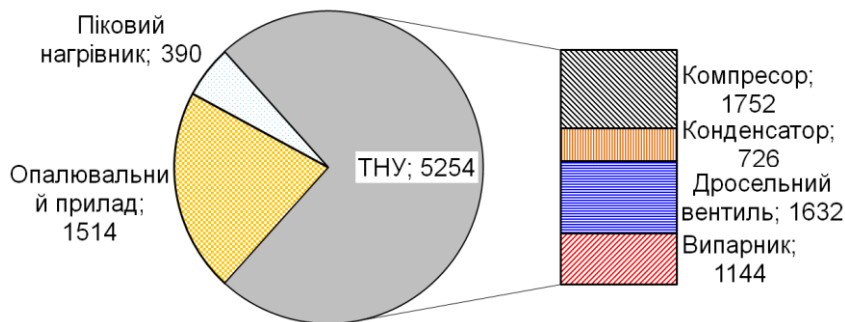


Рис. 5. Сумарні за опалювальний період значення деструкції ексергії $E_{D,k}^{year}$, кВт·год, в елементах ТНУ типу «повітря-вода», піковому нагрівнику та опалювальному приладі

Аналіз даних із рис. 6 вказує на те, що частка деструкції ексергії в кожному елементі ТНУ є різною в різні періоди опалювального сезону. Наприклад, якщо для 29-ї доби частка деструкції для компресора, дросельного вентиля та випарника є майже однаковою і знаходиться на рівні 28 %, то вже для 81-ї доби на компресор припадає найбільша частка деструкції ексергії – 35 %, дросельний вентиль забезпечує 31 %, випарник – 20 %, а конденсатор – 14 % загальної деструкції ексергії у ТНУ. Тобто для кожної доби внесок цих елементів у термодинамічну ефективність ТНУ є різним. Відповідно, на відміну від апробованих на практиці підходів з ексергетичного оцінювання ТНУ, де розглядають лише один режим роботи системи, для адекватного оцінювання ТНУ в складі системи теплозабезпечення, через мінливість режимів її роботи, запропоновано динамічний метод аналізу з подальшим інтегральним оцінюванням за допомогою сезонних значень відповідних критеріїв.

Таблиця 2. Математична модель із реалізації ексергетичного аналізу системи теплозабезпечення будинку на базі теплонасосної установки

Компонент	Рівняння масового балансу	Рівняння енергетичного балансу	Рівняння ексергетичного балансу	Рівняння теплопередачі
1	2	3	4	5
Будинок	$m_{B,i}(\tau_n) = m_{B,e}(\tau_n) = m_{B,w}(\tau_n)$	$Q_{trans}(\tau_n) + En_{inf}(\tau_n) + En_{vent}(\tau_n) + Q_{int}(\tau_n) + Q_{sol}(\tau_n) + Q_{dem}(\tau_n) = 0$ $En_{inf}(\tau_n) = c_p \cdot k_{inf} \cdot \left[k_{stack} \cdot \Delta T(\tau_n) + k_{wind} \cdot (w(\tau_n))^2 \right]^{n_{inf}} \times \nu_v \cdot \gamma_0 \cdot \eta \cdot \Delta T(\tau_n)$ $En_{vent}(\tau_n) = m_{vent}(\tau_n) \cdot [h_{vent,i}(\tau_n) - h_{vent,e}(\tau_n)]$ $Q_{int}(\tau_n) = Q_{int} = const \quad Q_{sol}(\tau_n) = \sum_{l=1}^L Q_{sol,l}(\tau_n)$ $Q_{dem}(\tau_n) = Q_{HS}(\tau_n)$	$E_{P,B}(\tau_n) = E_{dem}(\tau_n) = \left(1 - \frac{T_0(\tau_n)}{T_{in,B}} \right) Q_{dem}(\tau_n)$	$Q_{trans}(\tau_n) = \sum_{m=1}^M k_m \cdot F_m \cdot \Delta T_m(\tau_n)$
Система опалення (HS)	$m_{HS,in}(\tau_n) = m_{HS,out}(\tau_n) = m_{HS,w}(\tau_n) = m_{CD,w}(\tau_n)$	$Q_{HS}(\tau_n) = m_{HS,w}(\tau_n) \cdot [h_{HS,in,w}(\tau_n) - h_{HS,out,w}(\tau_n)]$	$E_{D,HS}(\tau_n) = m_{HS,w}(\tau_n) \times [e_{HS,in,w}(\tau_n) - e_{HS,out,w}(\tau_n)] - \left(1 - \frac{T_0}{T_{j,HS}} \right) Q_{HS}(\tau_n)$	$Q_{HS}(\tau_n) = k_{HS} \cdot F_{HS} \cdot \Delta T_{HS}(\tau_n)$
Піковий нагрівник (P)	$m_{P,in}(\tau_n) = m_{P,out}(\tau_n) = m_{P,w}(\tau_n) = m_{HS,w}(\tau_n) = m_{CD,w}(\tau_n)$	$Q_P(\tau_n) = m_{P,w}(\tau_n) \cdot [h_{P,in,w}(\tau_n) - h_{P,out,w}(\tau_n)]$	$E_{D,P}(\tau_n) = E_{F,P}(\tau_n) - m_{P,w}(\tau_n) \times [e_{P,out,w}(\tau_n) - e_{P,in,w}(\tau_n)]$ $E_{F,P}(\tau_n) = Q_P(\tau_n)$	—

1	2	3	4	5
Конденсатор (CD)	$m_{CD,in,r}(\tau_n) = m_{CD,out,r}(\tau_n) =$ $= m_{CD,r}(\tau_n) = m_{EV,r}(\tau_n) =$ $= m_{TV,r}(\tau_n) = m_{EV,r}(\tau_n)$ $m_{CD,in,w}(\tau_n) =$ $= m_{CD,out,w}(\tau_n) = m_{CD,w}(\tau_n)$	$Q_{CD}(\tau_n) = m_{CD,w}(\tau_n) \cdot [h_{CD,in,w}(\tau_n) - h_{CD,out,w}(\tau_n)]$ $Q_{CD}(\tau_n) = Q_{CD,cool}(\tau_n) + Q_{CD,con}(\tau_n)$ $Q_{CD,cool}(\tau_n) = m_{CD,r}(\tau_n) \cdot [h_{CD,in,r}(\tau_n) - h_{CD,cool,out,r}(\tau_n)]$ $Q_{CD,con}(\tau_n) = m_{CD,r}(\tau_n) \cdot [h_{CD,cool,out,r}(\tau_n) - h_{CD,out,r}(\tau_n)]$	$E_{D,CD}(\tau_n) = m_{CD,r}(\tau_n) \times$ $\times [e_{CD,in,r}(\tau_n) - e_{CD,out,r}(\tau_n)] -$ $- m_{CD,w}(\tau_n) \times$ $\times [e_{CD,out,w}(\tau_n) - e_{CD,in,w}(\tau_n)]$	$Q_{CD,cool}(\tau_n) = k_{CD,cool} \times$ $\times F_{CD,cool}(\tau_n) \times$ $\times \Delta T_{CD,cool}(\tau_n)$ $Q_{CD,con}(\tau_n) = k_{CD,con} \times$ $\times F_{CD,con}(\tau_n) \times$ $\times \Delta T_{CD,con}(\tau_n)$ $F_{CD} = F_{CD,cool}(\tau_n) +$ $+ F_{CD,con}(\tau_n)$
Дросельний вентиль (TV)	$m_{TV,in,r}(\tau_n) = m_{TV,out,r}(\tau_n) =$ $= m_{TV,r}(\tau_n) = m_{EV,r}(\tau_n) =$ $= m_{CM,r}(\tau_n) = m_{CD,r}(\tau_n)$	$h_{TV,in,r}(\tau_n) = h_{TV,out,r}(\tau_n)$	$E_{D,TV}(\tau_n) = m_{TV,r}(\tau_n) \times$ $\times [e_{EV,in,r}(\tau_n) - e_{EV,out,r}(\tau_n)]$	<p style="text-align: center;">—</p>
Випарник (EV)	$m_{EV,in,r}(\tau_n) = m_{EV,out,r}(\tau_n) =$ $= m_{EV,r}(\tau_n) = m_{CM,r}(\tau_n) =$ $= m_{CD,r}(\tau_n) = m_{TV,r}(\tau_n)$ $m_{EV,in,w}(\tau_n) =$ $= m_{EV,out,w}(\tau_n) = m_{EV,w}(\tau_n)$	$Q_{EV}(\tau_n) = m_{EV,r}(\tau_n) \cdot [h_{EV,out,r}(\tau_n) - h_{EV,in,r}(\tau_n)]$ $Q_{EV}(\tau_n) = m_{EV,w}(\tau_n) \cdot [h_{EV,in,w}(\tau_n) - h_{EV,out,w}(\tau_n)]$	$E_{D,EV}(\tau_n) = m_{EV,w}(\tau_n) \times$ $\times [e_{EV,in,w}(\tau_n) - e_{EV,out,w}(\tau_n)] -$ $- m_{EV,r}(\tau_n) \times$ $\times [e_{EV,out,r}(\tau_n) - e_{EV,in,r}(\tau_n)]$	$Q_{EV}(\tau_n) =$ $= k_{EV} \cdot F_{EV} \cdot \Delta T_{EV}$
Компресор (CM)	$m_{CM,in,r}(\tau_n) = m_{CM,out,r}(\tau_n) =$ $= m_{CM,r}(\tau_n) = m_{EV,r}(\tau_n) =$ $= m_{CD,r}(\tau_n) = m_{TV,r}(\tau_n)$	$N_{CM}(\tau_n) = m_{CM,r}(\tau_n) \cdot [h_{CM,out,r}(\tau_n) - h_{CM,in,r}(\tau_n)]$ $h_{CM,e,r}(\tau_n) = h_{CM,in,r}(\tau_n) + \frac{h_{CM,is,out,r}(\tau_n) - h_{CM,in,r}(\tau_n)}{\eta_{CM,is}(\tau_n)}$ $\eta_{CM,is}(\tau_n) = f(p_{CM,e,r}(\tau_n) / p_{CM,i,r}(\tau_n), a, b)$	$E_{D,CM}(\tau_n) = N_{CM}(\tau_n) -$ $- m_{CM,r}(\tau_n) \times$ $\times [e_{CM,out,r}(\tau_n) - e_{CM,in,r}(\tau_n)]$	<p style="text-align: center;">—</p>

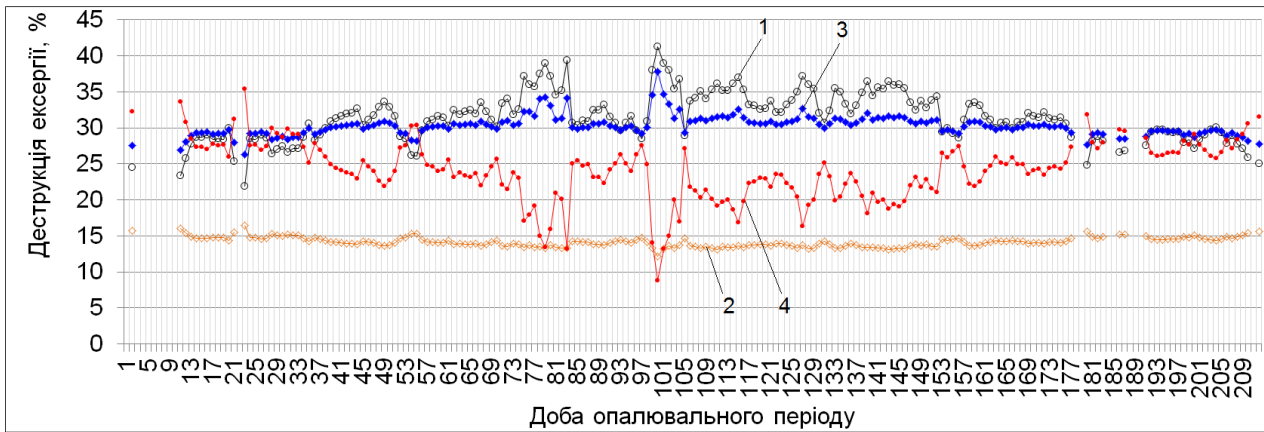


Рис. 6. Змінювання частки деструкції ексергії впродовж опалювального періоду в елементах ТНУ типу «повітря-вода» окремо взятого року:
1 – компресор; 2 – конденсатор; 3 – дросельний вентиль; 4 – випарник

Необхідність застосування динамічного методу у випадку реалізації ексергетичного оцінювання ТНУ зумовлена також тим, що за різних режимів роботи ТНУ параметри робочих тіл можуть перетинати, бути вищими або нижчими за параметри зовнішнього середовища. Відповідно ексергії «палива» та «продукту» визначатимуться по-різному.

Наприклад, якщо температура навколишнього природного середовища є нижчою за температуру робочого тіла теплового насоса, то ексергію «палива» та «продукту» у випарнику визначають відповідно за формулами

$$E_{F,EV}(\tau_n) = m_{EV,w}(\tau_n) \cdot [e_{EV,in,w}(\tau_n) - e_{EV,out,w}(\tau_n)]; \quad (14)$$

$$E_{P,EV}(\tau_n) = m_{EV,r}(\tau_n) \cdot [e_{EV,out,r}(\tau_n) - e_{EV,in,r}(\tau_n)], \quad (15)$$

де $e_{EV,in,w}(\tau_n)$, $e_{EV,out,w}(\tau_n)$ – питома ексергія робочого тіла низькопотенційного джерела теплового насоса на проміжку часу τ_n відповідно на вході та виході випарника, кДж/кг; $e_{EV,out,r}(\tau_n)$, $e_{EV,in,r}(\tau_n)$ – питома ексергія робочого тіла теплового насоса на проміжку часу τ_n відповідно на виході та вході у випарник, кДж/кг.

Якщо температура навколишнього природного середовища є вищою за температуру низькопотенційного джерела, то ексергію «палива» та «продукту» у випарнику визначають відповідно за формулами

$$E_{F,EV}(\tau_n) = m_{EV,r}(\tau_n) \cdot [e_{EV,in,r}(\tau_n) - e_{EV,out,r}(\tau_n)], \quad (16)$$

$$E_{P,EV}(\tau_n) = m_{EV,w}(\tau_n) \cdot [e_{EV,out,w}(\tau_n) - e_{EV,in,w}(\tau_n)]. \quad (17)$$

Результати ексергоекономічного та ексергоприродничого оцінювання системи теплотабезпечення будинку на базі ТНУ показали, що саме ТНУ характеризується не тільки найбільшою деструкцією ексергії (див. рис. 5), але і найвищими сумарними економічними затратами та сумарним впливом на довкілля.

У зв'язку з цим, в роботі запропоновано більш детально проаналізувати можливості змінювання характеристик цього елемента системи за допомогою методології поглибленого ексергетичного аналізу. Проте, на відміну від наявних у літературних джерелах результатів такого аналізу, де розглянуто тільки один режим

системи, у роботі запропоновано динамічний метод аналізу з подальшим обчисленням сезонних значень відповідних характеристик ексергетичного аналізу.

На рис. 7 для прикладу, показано сезонні значення внутрішньо залежної і тієї, що можна уникнути, та зовнішньо залежної і тієї, що можна уникнути, деструкції ексергії для кожного компонента ТНУ типу «повітря-вода», причому останню складову деструкції ексергії, у свою чергу, розподілено кількісно на ті інші елементи ТНУ, від термодинамічної ефективності яких вона залежить.

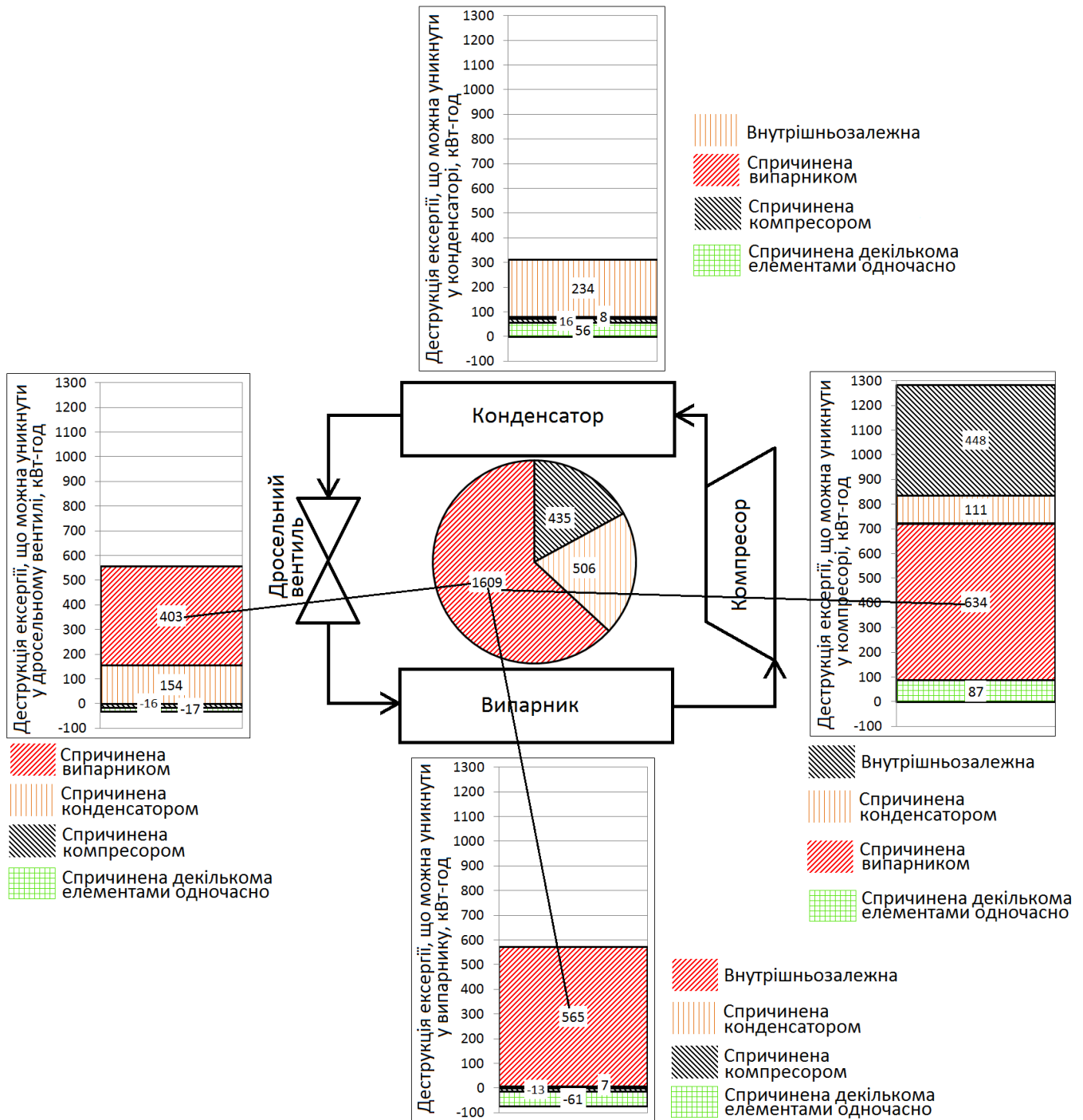


Рис. 7. Сезонні за опалювальний період значення деструкції ексергії, якої можна уникнути за рахунок удосконалення k-го елемента ТНУ типу «повітря-вода»

Як видно з рис. 7, найбільше значення деструкції ексергії у ТНУ, якої дійсно можна уникнути за рахунок удосконалення окремого елемента, і включає в себе

частину деструкції ексергії, яка виникає у цьому елементі, та частину, що має місце в інших елементах, характерне для випарника і становить 1609 кВт·год. У конденсаторі та компресорі ці частини деструкції відповідно становлять 506 та 435 кВт·год тобто відповідно у 3 та 3,7 рази менше, ніж у випарнику.

Ураховуючи різні підходи з визначення ексергії «палива» $E_{F,k}(\tau_n)$ та ексергії «продукту» $E_{P,k}(\tau_n)$ k -го елемента ТНУ для різних режимів, у роботі запропоновано реалізацію ексергоекономічної моделі також на основі динамічного підходу з визначенням для кожного режиму впродовж розрахункового часового кроку τ_n вартості ексергії «палива» $c_{F,k}(\tau_n)$ та ексергії «продукту» $c_{P,k}(\tau_n)$ та подальшим розрахунком за формулами

$$c_{F,k}^{year} = \frac{\sum_{\tau_n=1}^T c_{F,k}(\tau_n) \cdot E_{F,k}(\tau_n)}{\sum_{\tau_n=1}^T E_{F,k}(\tau_n)}; \quad (18)$$

$$c_{P,k}^{year} = \frac{\sum_{\tau_n=1}^T c_{P,k}(\tau_n) \cdot E_{P,k}(\tau_n)}{\sum_{\tau_n=1}^T E_{P,k}(\tau_n)}, \quad (19)$$

середньозважених за опалювальний сезон значень вартості ексергії «палива» $c_{F,k}^{year}$ та ексергії «продукту» $c_{P,k}^{year}$. В ексергоприродничій моделі запропоновано аналогічні показники.

Поглиблений ексергоекономічний аналіз дозволяє розділити й додатково згрупувати затрати, яких можна уникнути за рахунок удосконалення окремих елементів і які охоплюють частину затрат, зумовлених цим елементом, та частину затрат, характерних іншим елементам, але спричинених цим – $Z_k^{AV,\Sigma,year} + C_{D,k}^{AV,\Sigma,year}$. З результатів такого аналізу, наведених у табл. 3 для ТНУ типу «повітря-вода», видно, що найбільша частина затрат $Z_k^{AV,\Sigma,year} + C_{D,k}^{AV,\Sigma,year}$ характерна для компресора і дорівнює 751 євро/рік. Причому, як показав аналіз, ці затрати зумовлені вартістю капітальних затрат, витрат на обслуговування й ремонт, і їх можна зменшити зниженням термодинамічної ефективності цього елемента. Для випарника ця частина затрат становить 486 євро/рік і спричинена вона деструкцією ексергії у ньому, тобто зменшити їх можна підвищенням термодинамічної ефективності випарника.

Отже, суттєвого зниження загальної вартості $Z_k^{year} + C_{D,k}^{year}$ елементів ТНУ можна досягти, з одного боку, за допомогою зниження термодинамічної ефективності компресора, а з другого – підвищенням термодинамічної ефективності випарника.

У табл. 4 наведено результати поглибленого ексергоприродничого аналізу ТНУ. Як бачимо, найбільша частина впливу на довкілля $Y_k^{AV,\Sigma,year} + B_{D,k}^{AV,\Sigma,year}$, що можна уникнути за рахунок удосконалення окремих елементів, і включає в себе

вплив на довкілля, зумовлений цим елементом, та вплив на довкілля, характерний іншим елементам, але спричинений цим, припадає саме на випарник і дорівнює 70074 mPts/рік.

Таблиця 3. Дані щодо складових вартості $Z_k^{AV,\Sigma,year} + C_{D,k}^{AV,\Sigma,year}$ в елементах ТНУ типу «повітря-вода» відповідно до методології поглибленого ексергоекономічного аналізу

Компонент	$Z_k^{AV,\Sigma,year}$, євро/рік	$C_{D,k}^{AV,\Sigma,year}$, євро/рік	$Z_k^{AV,\Sigma,year} + C_{D,k}^{AV,\Sigma,year}$, євро/рік
Компресор	743	8,0	751
Конденсатор	0,7	113	114
Дросельний вентиль	0	6,9	6,9
Випарник	-6,4	493	486

Таблиця 4. Дані щодо складових впливу на довкілля $Y_k^{AV,\Sigma,year} + B_{D,k}^{AV,\Sigma,year}$ в елементах ТНУ типу «повітря-вода» відповідно до методології поглибленого ексергоприродничого аналізу

Компонент	$Y_k^{AV,\Sigma,year}$, mPts/рік	$B_{D,k}^{AV,\Sigma,year}$, mPts/рік	$Y_k^{AV,\Sigma,year} + B_{D,k}^{AV,\Sigma,year}$, mPts/рік
Компресор	2128	11285	13413
Конденсатор	675	15503	16178
Дросельний вентиль	0	823	823
Випарник	1257	68817	70074

Результати першої ітерації ексергетичного, ексергоекономічного та ексергоприродничого оцінювання свідчать про те, що для одночасного зниження деструкції ексергії, загальної вартості $Z_{HP}^{year} + C_{D,HP}^{year}$ та впливу на довкілля $Y_{HP}^{year} + B_{D,HP}^{year}$ ТНУ у складі системи теплозабезпечення будівель необхідно підвищити термодинамічну ефективність випарника знижуючи температурний напір у ньому. Як показав аналіз, сумарні витрати у ТНУ $Z_{HP}^{year} + C_{D,HP}^{year}$ обумовлені переважно його капітальними затратами, витратами на обслуговування і ремонт Z_{HP}^{year} , і їх можна суттєво зменшити за допомогою зниження термодинамічної ефективності компресора (див. табл. 3). Крім того, як показали результати поглибленого ексергоекономічного аналізу, певну частину затрат у компресор Z_{CM}^{year} можна зменшити за рахунок підвищення термодинамічної ефективності випарника та конденсатора. Тому запропоновано зменшити температурний напір у конденсаторі, що, згідно з отриманими результатами аналізу, з одного боку зменшить деструкцію ексергії у ТНУ та її негативний вплив на довкілля (див. табл. 4), а з другого – частково знизить капітальні затрати, витрати на обслуговування і ремонт у компресор Z_{CM}^{year} , а отже, і у ТНУ Z_{HP}^{year} .

На основі аналізу системи з позицій сумісного врахування Першого та Другого законів термодинаміки зроблено висновок, що певну частину деструкції

ексергії у ТНУ може бути знижено за рахунок удосконалення інших елементів системи теплозабезпечення (піковий нагрівник, опалювальний прилад) або структурних змін. З огляду на це, обґрунтовуючи параметри й тип системи відповідно до прийнятих критеріїв запропоновано проаналізувати такі варіанти: 1) – зниження температурного напору у випарнику та конденсаторі ТНУ, 2) – заміна опалювальних приладів, що працюють за температурним графіком 70 °C/50 °C, на низькотемпературні з температурним графіком 60 °C/40 °C, збільшуючи їх площу нагрівання; 3) – підвищення приведенного опору теплопередачі огорожувальної оболонки будинку.

У табл. 5 та 6 відповідно наведено ексергоекономічні та ексергоприродні показники запропонованих варіантів системи теплозабезпечення.

Отже, ексергоекономічні характеристики системи для варіанта 1 загалом виявилися кращими порівняно з іншими. Сумарні затрати $Z_{tot}^{year} + C_{D,tot}^{year}$ варіанта 1 дорівнюють 2510 євро/рік і є меншими відповідно на 9,8, 5,6 та 5,4 % порівняно з базовим та варіантами 2 та 3. Також для варіанта 1 система характеризується мінімальною відносною зміною r_{tot} вартості ексергії «продукту» та ексергії «палива» – 2542 %. Найбільше значення ексергоекономічного фактора f_{tot} системи характерне для варіанта 3 і дорівнює 96 %. Для варіанта 1 ексергоекономічний фактор системи дорівнює 93 %.

Таблиця 5. Ексергоекономічні показники запропонованих варіантів системи теплозабезпечення

Варіант	$c_{F,tot}^{year}$, євро/кВт·год	$c_{P,tot}^{year}$, євро/кВт·год	Z_{tot}^{year} , євро/рік	$C_{D,tot}^{year}$, євро/рік	$Z_{tot}^{year} + C_{D,tot}^{year}$, євро/рік	r_{tot}^{year} , %	f_{tot}^{year} , %
Базовий	0,035	0,951	2533	249	2782	2633	91
1	0,035	0,919	2338	172	2510	2542	93
2	0,035	0,928	2435	223	2658	2566	92
3	0,035	1,837	2545	106	2652	5178	96

Таблиця 6. Ексергоприродні показники запропонованих варіантів системи теплозабезпечення

Варіант	$b_{F,tot}^{year}$, mPts/кВт·год	$b_{P,tot}^{year}$, mPts/кВт·год	Y_{tot}^{year} , mPts/рік	$B_{D,tot}^{year}$, mPts/рік	$Y_{tot}^{year} + B_{D,tot}^{year}$, mPts/рік	$r_{b,tot}^{year}$, %	$f_{b,tot}^{year}$, %
Базовий	27	84	16159	193236	209395	210	7,7
1	27	76	28689	133325	162014	180	17,7
2	27	78	17462	173138	190600	188	9,2
3	27	85	28502	82506	111007	217	25,7

Сумарний вплив на довкілля $Y_{tot}^{year} + B_{D,tot}^{year}$ системи варіанта 3, що дорівнює 111007 євро/рік, є меншим відповідно на 47, 32 та 42 % порівняно з базовим та варіантами 1 і 2. Для варіанта 1 система характеризується мінімальною відносною зміною показника $r_{b,tot}$ – 180 %. Значення ексергоприродного фактора $f_{b,tot}$

системи є найбільшим для варіанта 3 і дорівнює 25,7 %. Отже, ексергоприродничі показники системи варіанта 3 виявилися найкращими.

З позицій як ексергетичного, так і ексергоекономічного та ексергоприродничого оцінювання перевагу надано системі теплозабезпечення з варіантами 1 та 3. Остаточне рішення слід ухвалювати за результатами експертного оцінювання.

На рис. 8 наведено значення цільових функцій обґрунтування параметрів системи теплозабезпечення будівлі на базі ТНУ для розглянутих варіантів.

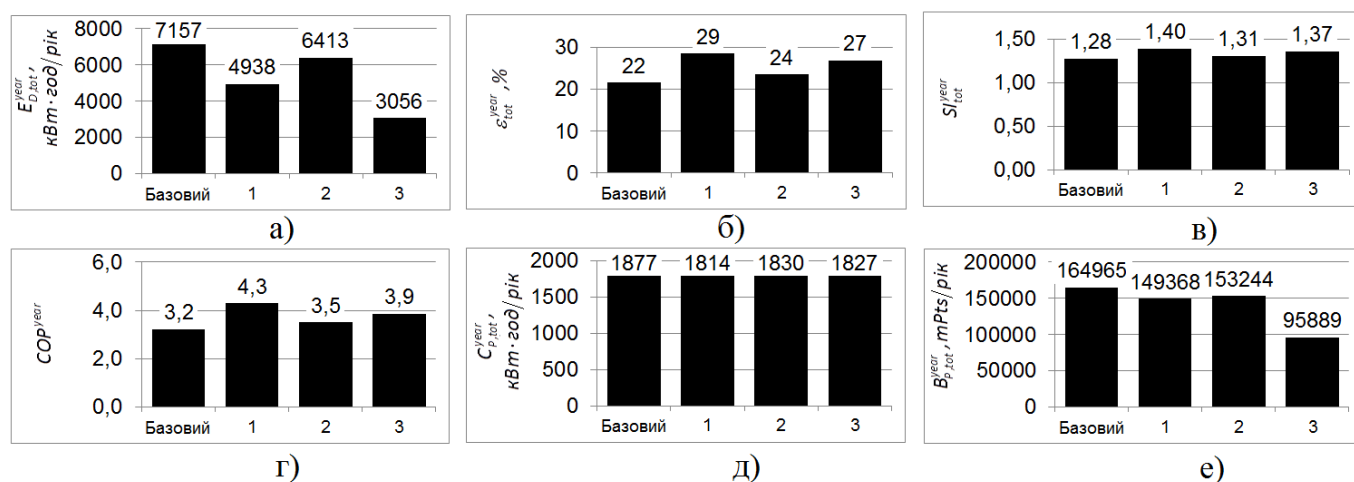


Рис. 8. Змінювання річних значень деструкції ексергії (а), ексергетичного ККД (б), коефіцієнта трансформації ТНУ (в), індекса сталості (г), ексергетичної вартості «продукту» (д) та негативного впливу на довкілля «продукту» (е) системи теплозабезпечення будинку на базі ТНУ

Отже, з наведених на рис. 8 даних видно, що для вибраної групи критеріїв найкращими є варіанти 1 та 3. Річна деструкція ексергії варіанта 3 є найнижчою, дорівнює 3056 Євро/рік і у 2,3, 1,6 та 2,1 рази нижча порівняно з базовим та варіантами 1 і 2 відповідно. Річний ексергетичний ККД варіанта 1 найвищий і становить 29 %, а базового та варіанта 2 і 3 відповідно 22, 24 і 27 %. Річний індекс сталості для базового варіанта, 1, 2 та 3 рівні відповідно 1,28, 1,40, 1,31 та 1,37, тобто за цим параметром варіант 1 також є найкращим. Варіант 1 характеризується також найвищим значенням річного коефіцієнта трансформації, який дорівнює 4,3. Для базового та варіантів 2 і 3 цей параметр становить відповідно 3,2, 3,5 та 3,9. Річна ексергетична вартість «продукту» системи для варіанта 1 є на 3,3, 0,9 та 0,7 % меншою порівняно з базовим та варіантами 2 і 3. Річний негативний вплив на довкілля «продукту» системи для варіанта 3 є на 42, 36 та 37 % менший порівняно відповідно з базовим та варіантами 1 та 2.

Таким чином, за допомогою методів ексергетичного аналізу після трьох ітерацій вдалося досягнути одночасного покращення ексергетичних, економічних та екологічних характеристик системи теплозабезпечення будинку з використанням ТНУ. Саме використання методів традиційного та поглибленого ексергетичного, ексергоекономічного та ексергоприродничого аналізу дало змогу чітко визначити місце, значення, джерела, вартість і вплив на довкілля термодинамічної неефективності у цій системі.

У четвертому розділі удосконалено метод та розроблені й реалізовані математичні моделі термодинамічної оптимізації «зразкових циклів» (тобто таких, реальне здійснення якого забезпечує досягнення максимуму внутрішнього ККД) деяких типів газотурбінних (ГТУ) та парогазових (ПГУ) теплоенергетичних установок.

Як критерій обґрунтування параметрів дійсних циклів ГТУ та ПГУ з котлом-утилізатором (КУ) вибрано внутрішній ККД, який в загальному випадку визначається за формулою

$$\eta_i = \frac{l_i}{q_l}, \quad (20)$$

де l_i – питома корисна внутрішня робота дійсного циклу (робота, отримана на валах обертання газової та парової турбін – корисний ефект); q_l – дійсна питома теплота, підведена ззовні до установки для реалізації технологічного процесу (теплота, підведена до установки у камері згоряння – затрачений ресурс).

Внутрішню роботу циклу ПГУ КУ можна визначити за формулою

$$l_i = (l_{t,gt} \cdot \eta_{0i,gt} + l_{t,st} \cdot m_{st} \cdot \eta_{0i,st}) - \left(\frac{l_{t,comp}}{\eta_{0i,comp}} + \frac{l_{t,fp} \cdot m_{st}}{\eta_{0i,fp}} \right), \quad (21)$$

де $l_{t,gt}$, $l_{t,st}$ – питома робота ізоентропічного розширення відповідно у газовій та паровій турбіні відносно 1 кг робочого тіла у цих компонентах; $l_{t,comp}$, $l_{t,fp}$ – питома робота ізоентропічного стиснення відповідно у компресорі та живильному насосі відносно 1 кг робочого тіла у цих компонентах; m_{st} – питома витрата пари у паровій турбіні, віднесена до 1 кг газу в газовій турбіні; $\eta_{0i,gt}$, $\eta_{0i,st}$ – відповідно відносний внутрішній ККД газової та парової турбін; $\eta_{0i,comp}$, $\eta_{0i,fp}$ – відповідно відносний внутрішній ККД компресора та живильного насоса.

Ввівши позначення

$$\eta_{exp} = \frac{(l_{t,gt} \cdot \eta_{0i,gt} + l_{t,st} \cdot m_{st} \cdot \eta_{0i,st})}{(l_{t,gt} + l_{t,st} \cdot m_{st})}, \quad (22)$$

де η_{exp} – приведений внутрішній ККД процесу розширення у газовій та паровій турбінах реального циклу ПГУ КУ,

$$\eta_{comp} = \frac{l_{t,comp} + l_{t,fp} \cdot m_{st}}{\left(\frac{l_{t,comp}}{\eta_{0i,comp}} + \frac{l_{t,fp} \cdot m_{st}}{\eta_{0i,fp}} \right)}, \quad (23)$$

де η_{comp} – приведений внутрішній ККД процесу стиснення у компресорі та живильному насосі реального циклу ПГУ КУ,

та позначивши $q_l = q_{t,l} \cdot \psi$, де $q_{t,l}$ – кількість теплоти, підведена ззовні у теоретичному оборотному циклі ПГУ КУ; ψ – коефіцієнт, що враховує змінювання q_l відносно $q_{t,l}$ формулу (20) можна записати як

$$\eta_i = \frac{(l_{t,gt} + l_{t,st} \cdot m_{st}) \cdot \eta_{exp} - (l_{t,comp} + l_{t,fp} \cdot m_{st}) / \eta_{comp}}{q_{t,l} \cdot \psi}. \quad (24)$$

Урахувавши, що відношення $\eta_t = \left[(l_{t,gt} + l_{t,st} \cdot m_{st}) - (l_{t,comp} + l_{t,fp} \cdot m_{st}) \right] / q_{t,l}$ є термічним ККД циклу ПГУ КУ, після деяких перетворень формулу (24) можна записати як

$$\eta_i = \frac{\eta_{exp}}{\psi} \left[\eta_t - \phi_{comp} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{exp} \cdot \eta_{comp}} - 1 \right) \right], \quad (25)$$

де $\phi_{comp} = (l_{t,comp} + l_{t,fp} \cdot m_{st}) / q_{t,l}$ – відносна робота стиснення.

Із формули (25) можна також визначити внутрішній ККД η_i автономної ГТУ, якщо врахувати, що $m_{st} = 0$.

Із формули (25) можна зробити такі важливі висновки:

– на внутрішній ККД η_i як автономної ГТУ, так і ПГУ КУ впливають термічний ККД η_t та відносна робота стиснення ϕ_{comp} ;

– кращим, з точки зору отримання максимуму внутрішнього ККД η_i цих установок, може бути не цикл із більшим термічним ККД η_t , а цикл, що має менший термічний ККД η_t , але і менше значення відносної роботи стиснення ϕ_{comp} .

Наприклад, для автономної безрегенеративної ГТУ термічний ККД η_t можна підвищити за рахунок збільшення ступеня стиснення циклового повітря. Відносну роботу стиснення ϕ_{comp} можна знизити зменшенням роботи стиснення повітря у компресорі та збільшенням теоретичної теплоти $q_{t,l}$, підведеної в циклі. У свою чергу, зменшення роботи стиснення повітря можна забезпечити за допомогою зниження ступеня стиснення та застосування багатоступеневого стиснення повітря з проміжним його охолодженням. Збільшення теоретичної теплоти $q_{t,l}$ можна досягти багатоступеневим стисненням повітря з проміжним охолодженням, багатоступеневим розширенням робочого тіла у ГТУ з проміжним підведенням теплоти, зменшенням загального ступеня стиснення повітря та підвищенням температури газів на вході у газову турбину.

Вплив інших параметрів, що входять у формулу (25), тобто η_{exp} , ψ , η_{comp} , на внутрішній ККД η_i ГТУ та ПГУ КУ не досліджувався, оскільки цей вплив незначний.

Шляхи підвищення внутрішнього ККД ПГУ КУ можна з'ясувати, якщо перетворити формулу (25) до вигляду

$$\eta_i = \frac{\eta_{0i,gt}}{\psi} \left[\eta_{t,BC} - \phi_{comp,BC} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{0i,gt} \cdot \eta_{0i,comp}} - 1 \right) \right] + \frac{1}{\psi \cdot q_{t,l}} \left[(l_{t,st} \cdot m_{st} \cdot \eta_{0i,st}) - \left(\frac{l_{t,fp} \cdot m_{st}}{\eta_{0i,fp}} \right) \right] = \eta_{i,BC} + M_{RC}, \quad (26)$$

де $\eta_{i,BC}$ – внутрішній ККД циклу Брайтона (цикл ГТУ); M_{RC} – показник, що дорівнює відношенню внутрішньої роботи реального циклу Ренкіна (цикл ПТУ) до дійсної теплоти, підведеної до ПГУ КУ ззовні.

Із формули (26) видно, що внутрішній ККД ПГУ КУ η_i можна підвищити, збільшивши внутрішній ККД ГТУ, що входить у склад ПГУ КУ (про можливі способи вказано вище) та показника M_{RC} .

У процесі таких досліджень не вивчався вплив параметрів паротурбінної установки (тиск, температура пари на вході у парову турбіну, наявність і тиск проміжного перегрівання пари, тиск у конденсаторі тощо) на внутрішній ККД ПГУ КУ. Їх значення приймалися відповідно до наявних рекомендацій.

Отже, прийнявши постійні параметри ПТУ, згідно формули (26), показник M_{RC} можна підвищити збільшенням питомої витрати пари у паровій турбіні (паропродуктивності котла-утилізатора) m_{st} та зменшенням теоретичної теплоти $q_{t,l}$, підведеної до ПГУ КУ.

У свою чергу, параметр m_{st} можна підвищити використанням багатоконтурних КУ (два або три контури) та збільшенням температури газів на вході у КУ, що можливо за рахунок зменшення ступеня стиснення повітря у компресорі ГТУ, підвищення температури газів на вході у газову турбіну та застосування проміжного підведення теплоти до ГТУ.

Зменшення теплоти $q_{t,l}$ можливе зниженням температури газів на вході у газову турбіну, збільшенням ступеня стиснення повітря і переходом від багатоступеневого до одноступеневого стиснення та розширення робочого тіла у ГТУ.

Наведені міркування свідчать про багатофакторний та неоднозначний вплив вказаних параметрів ГТУ як на ефективність автономних безрегенеративних ГТУ, так і на ПГУ КУ.

Виходячи з викладених теоретичних підходів, для роботи безрегенеративної автономної ГТУ за «зразковим циклом» було вибрано установку, подану на рис. 9, а для роботи ПГУ КУ за «зразковим циклом» – установку, наведену на рис. 10.

З метою проведення числових досліджень для оптимізації впливу параметрів на внутрішній ККД таких установок було створено та реалізовано відповідні математичні моделі й алгоритми, які ґрунтуються на використанні масових та енергетичних балансових рівнянь для контрольних об'ємів (див. формули (10) та (11)), кожен з яких становив собою окремий елемент установки (компресор, камера згоряння, турбіна, поверхня нагрівання котла-утилізатора, конденсатор, деаератор, насос тощо) за умови стаціонарного режиму.

Дослідження проводилися в два етапи. На першому етапі робочим тілом у ГТУ обрано атмосферне повітря на всіх ділянках установки без урахування втрати тиску робочого тіла під час його транспортування. Проведені на цьому етапі дослідження показали, що підвищення внутрішнього ККД циклу автономної безрегенеративної ГТУ та ПГУ КУ можна забезпечити збільшенням температури робочого тіла на вході у газову турбіну, застосуванням багатоступеневого стиснення повітря у компресорі з проміжним його охолодженням та багатоступеневого

розширення газу у ГТУ з проміжним підведенням теплоти. З підвищенням температури газів на вході у газову турбіну, зі збільшенням кількості ступенів та значень ступенів стиснення повітря і розширення газу в ГТУ, зростає оптимальне значення загального ступеня стиснення циклового повітря, за якого внутрішній ККД автономної безрегенеративної ГТУ досягає максимальних значень. Те ж саме відноситься і до ПГУ КУ за виключенням випадків, де використовується багатоступеневе стиснення повітря з проміжним його охолодженням. За заданого значення загального ступеня стиснення повітря у компресорі й температури робочого тіла на вході у газову турбіну мають місце оптимальні значення ступеня стиснення циклового повітря перед його проміжним охолодженням та оптимальні значення ступеня розширення газу перед проміжним підведенням теплоти, за яких внутрішні ККД автономної безрегенеративної ГТУ та ПГУ КУ набувають максимальних значень. Внутрішні ККД автономної безрегенеративної ГТУ і ПГУ КУ найбільше зростають зі збільшенням кількості ступенів стиснення та розширення робочого тіла в ГТУ від одного до двох. На сучасному етапі розвитку енергомашинобудування, з максимально можливим ступенем стиснення циклового повітря менше 50, доцільне використання багатоступеневого стиснення циклового повітря в автономній безрегенеративній ГТУ, а для ПГУ КУ, як показали результати числового моделювання, навпаки – неефективно. Також у ПГУ КУ підвищення внутрішнього ККД можна забезпечити завдяки використанню багатоконтурних КУ (два або три контури).

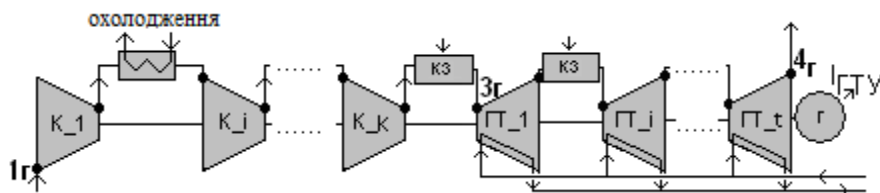


Рис. 9. Схема автономної безрегенеративної ГТУ, що може працювати за «зразковим циклом»

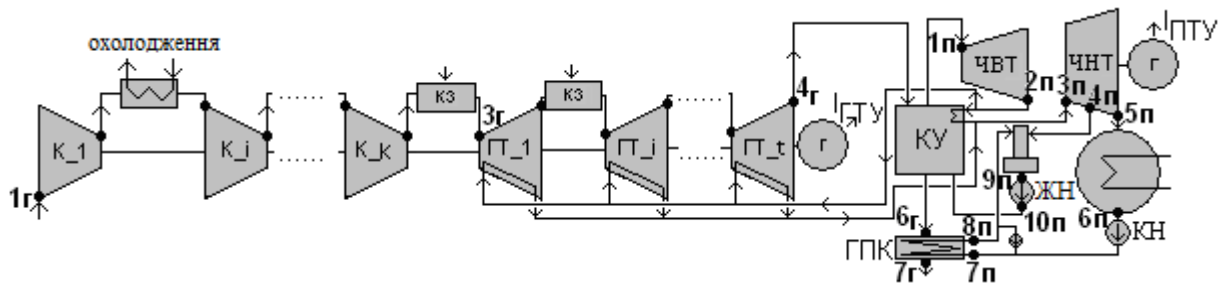


Рис. 10. Схема ПГУ КУ, яка може працювати за «зразковим циклом»

На другому етапі досліджень враховано зміну складу та кількості робочого тіла на різних ділянках ГТУ через спалювання палива, а також втрати тиску під час руху робочого тіла в окремих компонентах ГТУ та ПГУ КУ.

Результати досліджень другого етапу цілком підтвердили отримані дані першого етапу, але внесли відповідні корективи щодо кількісних значень параметрів та критеріїв оптимізації. Показано, що за рахунок ускладнення циклу та оптимізації параметрів можна забезпечити підвищення внутрішнього ККД автономної безрегенеративної ГТУ до 42...44 %, а ПГУ КУ – до 55...60 %. Результати

досліджень узгоджуються з даними, наведеними у літературних джерелах, для діючих установок.

У п'ятому розділі запропоновано розроблення відкритого, інтерактивного середовища, яке ґрунтується на використанні мережі Інтернет для широкого впровадження на практиці методології сучасної прикладної термодинаміки у моделюванні та оптимізації параметрів об'єктів та систем теплоенергетики. Таке середовище підтримує збирання, зберігання та оброблення даних і використовує розроблені математичні методи та алгоритми.

Для розробки та реалізації запропонованого інструменту в роботі запропоновано використати програмні пакети Mathcad, Maple та їхні Інтернет-додатки Mathcad Application/Calculation Server та MapleNet. Такий вибір зумовлений тим, що для реалізації термодинамічних методів необхідно розв'язувати нетипові розрахунки, яких зазвичай не практикують під час створення типових комп'ютерних бібліотек.

Спочатку виникла потреба у формалізації теплофізичних властивостей робочих тіл для реалізації числового моделювання у відповідному програмному пакеті. Сьогодні запропоновано низку програм, де можна визначити ці властивості, але реалізувати подальше моделювання в цій самій програмі неможливо або є обмеженим. У роботі, на основі табличних даних, за допомогою сплайнової інтерполяції, запропоновано метод створення функцій з розрахунку теплофізичних властивостей робочих тіл у програмному пакеті, де одночасно реалізовується модель, причому для функції двох аргументів розроблений метод подвійної сплайнової інтерполяції. Це дозволило створити як прямі (наприклад, ентальпія як функція тиску й температури), так і обернені (наприклад, тиск як функція температури та ентальпії) функції.

На рис. 11 наведено приклад Інтернет-сторінки <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/R410a-eng.html> з доступу до функцій з розрахунку теплофізичних властивостей фреону R410a. Запропонований Інтернет-ресурс забезпечує інтерактивний розрахунок властивостей робочих тіл, можливість завантаження програмного коду функції на персональний комп'ютер та передбачає реалізацію Інтернет-посилань (reference) на «хмарні» функції.

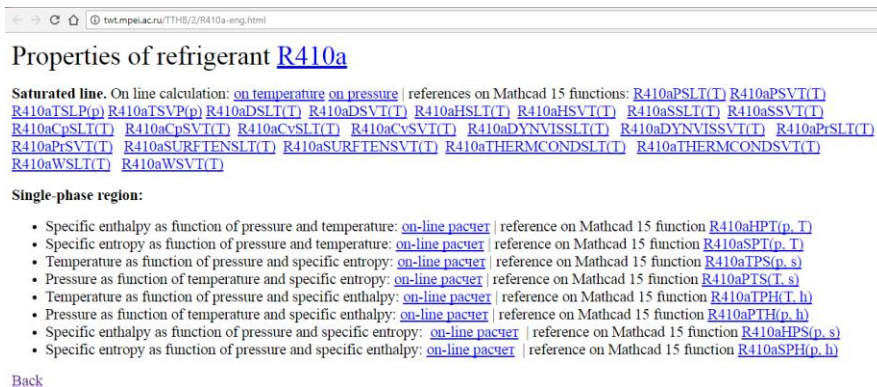


Рис. 11. Інтернет-ресурс <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/R410a-eng.html> для інтерактивного розрахунку, завантаження та посилання на «хмарну» функцію з визначення теплофізичних властивостей фреону R410a

На рис. 12 наведено приклад Інтернет-ресурсу, який пропонує інтерактивний ексергоекономічний аналіз когенераційної установки на базі ГТУ. Це – одна з типових задач оцінювання дійсної вартості двох продуктів системи, що виробляються одночасно, на основі ексергетичного підходу (CGAM-задача).

Запропонований інтерактивний веб-ресурс передбачає ексергоекономічну оптимізацію методом наближень.

Перебуваючи в Інтернет-браузері та використовуючи інтерактивний інтерфейс взаємодії, є можливість введення числових характеристик варіанту системи (рис. 12) та отримання розгорнутої інформації розрахунку такої системи: послідовність розрахунку, результати як кінцевих, так і проміжних розрахунків, графічну та текстову інтерпретацію отриманих результатів.

Електрична потужність нетто N_E , МВт Продукт котла-утилізатора (КУ) Масова витрата води Дані, не змінюються в процесі оптимізації, оскільки визначають продукт системи, який повинен бути постійним

Теплова потужність КУ Q_{HR} , МВт. Якщо продукт котла-утилізатора введений масовою витратою води, то ця комірка не заповнюється, а теплова потужність КУ розраховується (див. далі)

Масова витрата води через КУ G_W , МВт. Якщо продукт КУ введений тепловою потужністю, то ця комірка не заповнюється, а масова витрата води через КУ розраховується (див. далі)

Тиск води на вході в КУ P_8 , МПа Температура води на вході в КУ T_8 , °C Температура води на виході з КУ T_9 , °C

Температура зовнішнього повітря T_{in} , °C Відносна вологість зовнішнього повітря ϕ_{in} , % Тиск зовнішнього повітря P_{in} , МПа

Ізоентропичний ККД повітряного компресора η_{comp} , % Ізоентропичний ККД паливного компресора $\eta_{FC,comp}$, % Ізоентропичний ККД газової турбіни η_{GT} , %

Степінь підвищення тиску у компресорі π_c Температура робочого тіла на виходу у газову турбіну T_4 , °C Паливо - метан з нижчою теплою згорання $Q_L=50056$ кДж/кг

Втрати тиску у камері згорання δr_{FC} , % Надлишковий тиск перед камерою згорання ΔP_{FC} , МПа Тиск палива у газопроводі $P_{FC,in}$, МПа

Температура палива у газопроводі $T_{FC,in}$, °C Температура визначення нижчої теплоти згорання палива T_{Ql} , °C

Температура повітря на виході із регенерації T_3 , °C

Втрати тиску повітря у регенераторі $\delta r_{p,v}$, %

Втрати тиску продуктів згорання у регенераторі $\delta r_{p,g}$, %

Втрати тиску води у КУ $\delta r_{w,HR}$, %

Температурний напір у "pinch"-точці КУ $\delta T_{pinch,HR}$, К

Втрати тиску продуктів згорання у КУ $\delta r_{g,HR}$, %

Ціна первинного палива c_{Fuel} , USD/ГДж Ставка дисконту r , %

Щорічні відрахування на ремонт та експлуатацію установки $c_{O\&M}$, %/year Термін експлуатації установки LT, роки

Щорічна кількість годин експлуатації системи, години

Рис. 12. Приклад блока вхідних даних для інтерактивної ексергоекономічної оптимізації методом наближень когенераційної ГТУ, підготовленого за допомогою технології Mathcad Calculation Server і розміщеного за адресою <http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/Vv-43-eng-ex-brayton-cogen.xmcd>

Наступний приклад веб-ресурсу (<http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/PTU/Vv-39-ua-Exergy-analysis-of-building-systems.xmcd>) стосується реалізації інтерактивного ексергетичного аналізу системи теплозабезпечення будинку (рис. 13, 14).

На рис. 14 наведено фрагмент інтерактивного розрахунку, де графічно показані потоки енергії та ексергії через елементи системи теплозабезпечення, включаючи забезпечення потреб у гарячому водопостачанні, вентиляції, освітленні та електрообладнанні. Цей графік чітко показує місце найбільших втрат ексергії. Наприклад, енергетичний аналіз свідчить про те, що витік енергії за межі системи є найбільшим на етапі перетворення первинного енергоносія та в огорожувальній конструкції будинку. Ексергетичний аналіз показує, що найбільші втрати ексергії відбуваються на етапі перетворення первинного енергоносія та у генераторі теплоти.

Результатом створення інтерактивних інструментів та алгоритмів для числового моделювання теплоенергетичних процесів є публікація книги «Теплотехнічні етюди в Excel, Mathcad and Internet» (<http://www.springer.com/gp/book/9783319266732>). Дана робота пропонує основи застосування математичних методів, сучасних засобів розрахунку (Excel, Mathcad, SMATH тощо) та Інтернету для розв'язання різноманітних задач термодинаміки, теплообміну, гідрогазодинаміки та енергоефективності. Розв'язання задач доповнюється веб-адресами на сторінки, де можна виконати інтерактивний незалежний розрахунок, зробити посилання на «хмарну» функцію або завантажити відповідні файли. Остання можливість дозволяє змінювати та доповнювати

запропонований розрахунок. Окремо було створено форум даної книги на сайті спільноти користувачів ресурсів корпорації РТС (<https://community.ptc.com/t5/Thermal-Engineering-studies-with/gp-p/2035>).

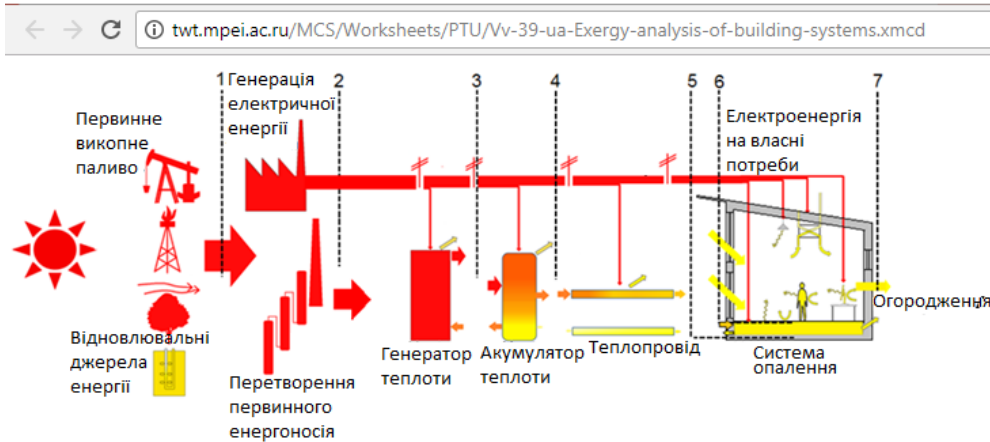


Рис. 13. Послідовність елементів системи теплозабезпечення будинку від первинного перетворення до кінцевого споживання, включаючи проміжні елементи перетворення та передачі енергії

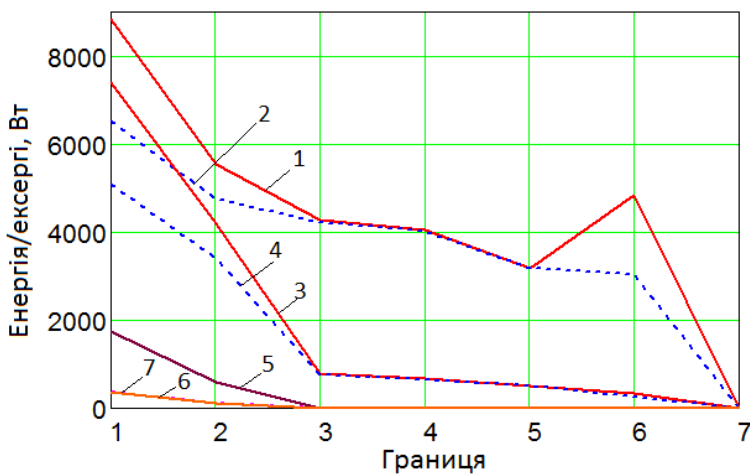


Рис. 14. Потіки енергії та ексергії через елементи системи теплозабезпечення будинку:
 1 – загальний потік енергії;
 2 – потік енергії для теплозабезпечення (викопне паливо і відновлювальне);
 3 – загальний потік ексергії;
 4 – потік ексергії для теплозабезпечення (викопне паливо і відновлювальне);
 5 – електрична енергія для освітлення та електрообладнання;
 6 – енергія для ГВП;
 7 – ексергія для ГВП

Maple – інше програмне забезпечення, яке також надає послуги із «хмарних» обчислень. Включення в останній версії Maple 2016 даних з теплофізичних властивостей робочих тіл значно полегшує реалізацію теплотехнічного моделювання без залучення додаткових пакетів. Набір Maple-документів, розміщених за Інтернет-адресою <https://fr.maplesoft.com/applications/Category.aspx?cid=2886> для реалізації теплотехнічних розрахунків, підготовлено автором і завантажено на сайт користувачів Maplesoft для апробації, обговорення та використання на практиці.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновано теоретичне узагальнення і нове розв'язання науково-прикладної проблеми удосконалення методів і засобів моделювання теплоенергетичних систем, включаючи мінливість їх режимів у результаті впливу випадкового характеру погодно-кліматичного чинника.

У результаті виконаних досліджень отримано такі основні наукові й практичні результати:

1. На основі аналізу наявної методології створення й реалізації математичних моделей з дослідження об'єктів і систем теплоенергетики показано, що сумісний розгляд Першого та Другого законів термодинаміки та їх безпосереднє поєднання з економічним та екологічним оцінюванням є науково обґрунтованою теорією моделювання таких систем, зокрема з урахуванням мінливого характеру їх режимів роботи, зумовленого впливом погодно-кліматичних факторів, оскільки це дає можливість кількісно оцінити необоротності різної природи в елементах системи на основі єдиного підходу та забезпечує зв'язати не тільки зовнішні, але і внутрішні, зумовлені термодинамічною недосконалістю елементів таких систем, фактори впливу на їх економічні та екологічні характеристики.

2. Розроблено метод розрахунку потреб ексергії для створення теплового комфорту всередині будинку шляхом врахування за допомогою теорії ймовірностей впливу випадкового характеру метеорологічних факторів в межах опалювального періоду, на основі якого в умовах Рівненського регіону показано та розрахунковим шляхом підтверджено, що при визначенні сезонних потреб ексергії на теплозабезпечення будинку використання стаціонарного підходу призводить до заниження результатів на 12...28 % у порівнянні із динамічним підходом.

3. Розроблений та реалізований на прикладі умов Рівненського регіону метод із розрахунку параметрів природної вентиляції будинку на основі врахування за допомогою теорії ймовірностей випадкового характеру впливу метеорологічних факторів в межах опалювального періоду показав, що використання середньостатистичних значень метеорологічних параметрів (стаціонарний підхід) у випадку визначення сумарних за опалювальний сезон витрат енергії на нагрівання інфільтраційного повітря природної вентиляції є недостатньо обґрунтованим і призводить до заниження даної частини енергоспоживання будинку від 6 до 12 % у порівнянні із динамічним методом, який враховує зміни режимів природної вентиляції.

4. Врахування впливу випадкового характеру змін температури та швидкості зовнішнього повітря показало, що для умов Рівненського регіону, у випадку заміни природної вентиляції механічною, дисконтований термін окупності даного енергоефективного заходу має певну невизначеність і коливається в межах 4...7 років і більше. Крім того, грошовий потік, визначений на основі середніх за опалювальний період значень температури та швидкості зовнішнього повітря (стаціонарний підхід) є заниженим. Це призводить до завищення можливого терміну окупності та неточності з визначення інших показників економічної доцільності (чистий дисконтований дохід, індекс дохідності тощо).

5. Запропоновано метод із визначення критеріїв обґрунтування параметрів приведенного опору теплопередачі огорожувальної конструкції будівлі та розрахунку невизначеності цього рішення у разі диференціації цін на енергоносії залежно від кількості спожитої енергії на основі врахування за допомогою теорії ймовірностей випадкового характеру впливу метеорологічного фактора (кількості градусо-днів) у багаторічному перерізі. Реалізація цього методу показала, що критерії економічної доцільності досить суттєво відхиляються (до 30 %) від показників,

розрахованих за існуючим стаціонарним підходом, де параметри метеофакторів приймаються постійними. Крім того, в даному випадку показано, що зміна кількості градусо-діб у багаторічному перерізі суттєво впливає на коливання дисконтованого терміну окупності в межах 4,5...8 років.

6. Показано та обґрунтовано факт зростання показника мінливості через вплив погодно-кліматичного чинника режимів роботи системи теплозабезпечення у разі впровадження в будівлях заходів із енергоефективності. Для запропонованих у дослідженнях заходів із підвищення енергоефективності будинку, коефіцієнт мінливості потреб енергії всередині сезону зростає від 0,44...0,65 до 0,62...0,90, а потреб ексергії – від 0,60...1,00 до 0,79...1,22. Коефіцієнт мінливості сезонних потреб енергії збільшується від 0,115 до 0,190, а сезонних потреб ексергії – від 0,224 до 0,304. Зростання мінливості режимів роботи системи теплозабезпечення будинку з підвищенням його теплотехнічних характеристик обумовлює зростання невизначеності критеріїв ухвалення техніко-технологічних рішень у цих системах.

7. На відміну від апробованих на практиці підходів з реалізації методів прикладної термодинаміки в системах теплозабезпечення будівель та їх елементах, де враховується лише один режим роботи або стаціонарний підхід, у роботі, вперше, для врахування мінливого та випадкового характеру впливу погодно-кліматичних факторів на технологічний процес, на основі моделювання, обґрунтовано доцільність реалізації методів прикладної термодинаміки із застосуванням динамічних підходів з подальшим розрахунком річних або сезонних значень відповідних критеріїв ухвалення рішень.

8. Удосконалено метод комплексного ексергетичного, ексергоекономічного та ексергоприродничого аналізу систем теплозабезпечення будівель на базі ТНУ із застосування динамічного підходу з подальшим визначенням річних показників. Реалізація даного методу дала змогу уже при першій ітерації виявити місцезнаходження, причини, а також розрахувати значення, вартість і негативний вплив на довкілля термодинамічної неефективності елементів системи. Із запропонованих до базового варіантів (змінювання конструктивних характеристик ТНУ; перехід на низькотемпературну систему опалення; підвищення теплотехнічних характеристик будинків) найкращими енергетичними, економічними та екологічними критеріями характеризується перший варіант, де передбачено зниження температурного напору у випарнику та конденсаторі ТНУ, і третій варіант, у якому передбачено підвищення приведенного опору теплопередачі огорожувальної оболонки будинку та збільшення частки надходження сонячної радіації через прозорі огороження.

9. Показано, що, порівняно з наявними, найбільш розповсюдженими технологіями, можливостей підвищення ефективності використання ексергії первинного енергоносія в ТНУ ще не вичерпано. Виявлено, що через взаємозв'язок між елементами технологічної схеми «ТНУ-пікове джерело-опалювальний прилад-будинок» саме використання ТНУ забезпечує: зниження до 2,3 рази річної деструкції ексергії системи; підвищення на 2...7 % в абсолютних одиницях річного ексергетичного ККД; зростання річного коефіцієнта трансформації ТНУ до 4...5 і вище; зниження річної ексергетичної вартості кінцевого «продукту» системи до

3,5 %; зменшення річного негативного впливу на довкілля «продукту» системи до 40 %.

10. Розвинено метод термодинамічної оптимізації газотурбінних і парогазових теплоенергетичних установок завдяки використанню поняття «зразковий термодинамічний цикл», що забезпечило створення й реалізацію математичних моделей та алгоритмів термодинамічної оптимізації газотурбінних і парогазових теплоенергетичних установок з обґрунтування структури та параметрів таких установок при підвищенні їх енергетичного ККД. Показано, що за рахунок ускладнення циклу (застосування в газотурбінній установці багатоступеневого стиснення повітря з проміжним його охолодженням та багатоступеневого розширення газу з проміжним підведенням теплоти), підвищення температури робочого тіла на вході у газову турбіну та оптимізації параметрів термодинамічного циклу можна забезпечити підвищення внутрішнього ККД автономної безрегенеративної газотурбінної установки до 42...44 %, а парогазової установки з колом-утилізатором – до 50...60 %. Отримані результати добре узгоджуються з даними діючих установок.

11. Розроблено та реалізовано відкриті інтерактивні алгоритми з моделювання об'єктів теплоенергетики через створення в мережі Інтернет за допомогою комп'ютерних програм відповідної бази даних, що у свою чергу, дало можливість збирання, зберігання, оброблення даних із використанням сучасних математичних методів розрахунків і оптимізації. Розроблені алгоритми передбачають не тільки їх завантаження в персональний комп'ютер, але і реалізацію інтерактивних розрахунків з використанням «хмарних» Інтернет-ресурсів.

12. Запропоновано та реалізовано удосконалений метод із визначення теплофізичних властивостей робочих тіл на основі табличних даних за допомогою подвійної сплайнової інтерполяції з урахуванням ліній розривів та зламів функціональних залежностей, що дозволило створити як прямі, так і обернені функції для моделювання теплофізичних властивостей робочих тіл (фреонів R22, R134a, R407c, R410a, аміаку та вуглекислоти).

13. Розроблені нові та вдосконалені наявні методи й засоби математичного моделювання систем і об'єктів теплоенергетики на основі термодинамічних підходів забезпечили створення методик, алгоритмів, комп'ютерних програм та Інтернет-ресурсів, які використовують на виробництві під час обґрунтування рішень на стадії проектування та модернізації систем, а також упроваджують у навчальний процес для викладання низки дисциплін та виконання магістерських робіт студентами енергетичних спеціальностей Національного університету водного господарства та природокористування та КПІ ім. Ігоря Сікорського. Результати впровадження підтверджено відповідними документами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ochkov V. Thermal Engineering Studies with Excel, Mathcad and Internet / V. Ochkov, K. Orlov, V. Voloshchuk. – Switzerland : Springer international publishing, 2016. – 307 p. (*монографія, іноземне видання, SCOPUS Database*).

2. Voloshchuk V. A. Advanced exergetic analysis of a heat pump providing space heating in built environment [Text] / V. A. Voloshchuk // *Energetika*. – 2017. – 63 (3). – P. 83–92. (*іноземне видання, SCOPUS Database*).

3. Voloshchuk V. A. Effect of variation of operational regimes in building environment on results of its energy and exergy assessments [Text] / V. A. Voloshchuk // *Civil and Environmental Engineering Reports*. – 2017. – 24 (1). – P. 145–158. (*іноземне видання*).

4. Ochkov V. F. Calculations of thermodynamics cycles via Internet [Text] / Ochkov V. F., Aleksandrov A. A., Voloshchuk V. A., Dorokhov E. V., Orlov K. A. // *Thermal Engineering*. – 2009. – Vol. 56 – P. 86–89. (*іноземне видання, SCOPUS Database*).

5. Волощук В. А. Сетевой, интерактивный открытый расчет газотурбинной энергетической установки / В. А. Волощук, В. Ф. Очков, К. А. Орлов // *Автоматизация в энергетике*. – 2010. – № 2 (7). – С. 10–19. (*іноземне видання*).

6. Очков В. Ф. «Облачный» сервис по свойствам рабочих веществ холодильных установок [Текст] / В. Ф. Очков, К. А. Орлов, А. В. Очков, В. Е. Знаменский, В. Ю. Чижмакова, В. А. Волощук // *Вестник Международной академии холода*. – 2013. – № 2. – С. 23–28. (*іноземне видання*).

7. Волощук В. А. Термодинамічна оптимізація зразкових циклів деяких схем ГТУ та ПГУ [Текст] / В. А. Волощук // *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический университет»*. – 2011. – № 6. – С. 77–88. (*наукове фахове видання*).

8. Волощук В. А. Підвищення ефективності роботи централізованого теплопостачання за рахунок метеорологічного забезпечення / В. А. Волощук, А. М. Рокочинський // *Праці інституту електродинаміки Національної академії наук України: зб. наук. пр.* – 2004. – Спец. вип. – С. 74–77. (*наукове фахове видання*).

9. Очков В. Ф. Интернет-розрахунки термодинамічних циклів [Текст] / В. Ф. Очков, А. А. Александров, В. А. Волощук, Є. В. Дорохов, К. О. Орлов // *Вісник інженерної академії України*. – 2008. – № 3–4. – С. 31–36. (*наукове фахове видання*).

10. Волощук В. А. Дослідження та аналіз деяких схем ГТУ та ПГУ за допомогою сучасних інформаційних технологій [Текст] / В. А. Волощук, В. Ф. Очков // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – 2009. – № 2. – С. 139–145. (*наукове фахове видання*).

11. Волощук В. А. Термодинамічна оптимізація зразкового циклу бінарної ПГУ з котлом-утилізатором при допомозі сучасних інформаційних технологій [Текст] / В. А. Волощук, В. Ф. Очков, К. А. Орлов // *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический университет»*. – 2010. – № 2. – С. 102–112. (*наукове фахове видання*).

12. Волощук В. А. Дослідження циклів парогазових енергетичних установок за допомогою сучасних інформаційних технологій [Текст] / В. А. Волощук, В. Ф. Очков, К. О. Орлов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 5/72. – С. 71–76. (*наукове фахове видання*).

13. Волощук В. А. Визначення кліматологічно-оптимального опору теплопередачі огорожувальних конструкції будинків при улаштуванні теплової

ізоляції [Текст] / В. А. Волощук, Н. А. Фроленкова, А. М. Рокочинський // *Енергетика та електрифікація*. – 2011. – № 5. – С. 57–62. (наукове фахове видання).

14. Волощук В. А. Вплив змінності погодно-кліматичного чинника на невизначеність при виборі термічного опору огорожувальної конструкції будинку [Текст] / В. А. Волощук // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Тем. вип. «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». – 2012. – № 8. – С. 77–88. (наукове фахове видання).

15. Волощук В. А. Вибір термічного опору огорожувальної конструкції з урахуванням змінності погодно-кліматичного фактора [Текст] / В. А. Волощук // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2012. – № 4. С. 124–130. (наукове фахове видання, РІНЦ).

16. Волощук В. А. Відкриті інтерактивні алгоритми для теплофізичного моделювання енергоустановок [Текст] / В. А. Волощук // *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. – Рівне, 2013. – Вип. 4 (64). – С. 382–391. (наукове фахове видання).

17. Волощук В. А. Використання теплоенергетичного потенціалу зовнішнього клімату для зменшення енергозатрат при опаленні будівель [Текст] / В. А. Волощук // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. – Львів, 2013. – № 758. – С. 97–105. (наукове фахове видання).

18. Волощук В. А. Техніко-економічна оптимізація переходу на тепlopостачання із використанням теплового насоса / В. А. Волощук, М. А. Мартиняк, Й. С. Мисак // *Вісник інженерної академії України*. – 2014. – № 2. – С. 259–265. (наукове фахове видання).

19. Волощук В. А. Вплив імовірнісного характеру зміни погодно-кліматичних умов на параметри природної вентиляції будинку [Текст] / В. А. Волощук, А. М. Рокочинський // *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: наук.-техн. зб.* – 2015. – Т. 19, № 2. – С. 134–142. (наукове фахове видання, РІНЦ).

20. Волощук В. А. Впровадження енергоефективних рішень із використанням місцевих та відновлювальних джерел енергії при теплозабезпеченні навчальних закладів в умовах України [Текст] / В. А. Волощук // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – 2015. – № 15 (1124). – С. 156–165. (наукове фахове видання).

21. Волощук В. А. Оцінка потенціалу стічних вод у теплонасосних установках індивідуального будинку / В. А. Волощук, О. О. Грицина, М. В. Бляшина, В. С. Жукова // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. – 2017. – № 15 (1124). – С. 156–165. (наукове фахове видання).

22. Волощук В. А. Поглиблений ексергетичний аналіз теплового насоса як елемента системи теплозабезпечення будинку з урахуванням сезонних коливань режимів роботи [Текст] / В. А. Волощук // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 10(1232). – С. 59–65. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.08. (наукове фахове видання, *Ulrich's Periodicals Directory*, *Index Copernicus*).

23. Очков В. Ф. Сетевые расчеты процессов и циклов теплоэнергетических установок / В. Ф. Очков, А. А. Александров, К. А. Орлов, В. А. Волощук, А. В. Очков // Новое в российской электроэнергетике. – 2008. – № 10. – С. 5–27. (*іноземне видання*).

24. Волощук В. А. Термодинамическая оптимизация циклов некоторых ГТУ и ПГУ при помощи современных информационных технологий. Часть 1 [Текст] / В. А. Волощук, В. Ф. Очков, К. О. Орлов // Новое в российской электроэнергетике. – 2011. – № 7. – С. 23–42. (*іноземне видання*).

25. Волощук В. А. Термодинамическая оптимизация циклов некоторых ГТУ и ПГУ при помощи современных информационных технологий. Часть 2 [Текст] / В. А. Волощук, В. Ф. Очков, К. О. Орлов // Новое в российской электроэнергетике. – 2011. – № 8. – С. 15–25. (*іноземне видання*).

26. Волощук В. А. Использование современных информационных технологий для моделирования перспективных энергоустановок [Текст] / В. А. Волощук, В. Ф. Очков // Открытое образование. – 2013. – № 1 (96). – С. 50–55. (*іноземне видання*).

27. Волощук В. А. Визначення тепловтрат будівель з урахуванням впливу швидкості вітру та приходу сонячної радіації / В. А. Волощук, А. М. Рокочинський // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – 2006. – Вип. 2 (34), ч. 2. – С. 182–191.

28. Волощук В. А. Оптимізація теплозахисту огорожувальних конструкцій при поелементному підході / В. А. Волощук // Енергоефективність в будівництві та архітектурі: наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 4. – С. 47-51.

29. Волощук В. А. Математична модель оптимізації об'ємно-планувальних рішень для будівель у формі багатогранників з метою зниження затрат енергії на їх опалення / В. А. Волощук // Енергоефективність в будівництві та архітектурі: наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 5. – С. 15–18.

30. Волощук В. А. Стічні води як джерело енергії у системах теплозабезпечення нового покоління / В. А. Волощук, О. О. Грицина // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2016. – № 27. – С. 63–70.

31. Ochkov V. "Cloud" service for computer simulation of air-conditioning and refrigerating systems [Text] / V. Ochkov, V. Voloshchuk, K. Orlov, A Ochkov // The 1st International Conference on Energy and Indoor Environment for Hot Climates by ASHRAE. Program and Proceedings, Doha, Qatar, February, 24–26, 2014. – Doha, 2014. (*іноземне видання, SCOPUS Database*). Режим доступу – https://www.techstreet.com/standards/-cloud-service-for-computer-simulation-of-air-conditioning-and-refrigerating-systems?product_id=1876438.

32. Voloshchuk V. A. Advanced exergetic analysis of a heat pump providing space heating in built environment [Text] / V. A. Voloshchuk // The 14th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI-2017). Program and Proceedings, Kaunas, Lithuania May, 25–26, 2017. – Kaunas, 2017. – P. II-108.

33. Voloshchuk V. A. On-line, interactive tools and algorithms for thermal calculations of heat pumps [Text] / V. A. Voloshchuk // The 13th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI-2016). Program and Proceedings, Kaunas, Lithuania May, 26–27, 2016. – Kaunas, 2016. – P. II-72–II-81.

34. Voloshchuk V. A. New generation of computer-aided tools for exergetic analysis of thermal systems [Text] / V. A. Voloshchuk, V. F. Ochkov // The 4th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering (CPOTE-2016). Program and Proceedings, Gliwice – Katowice, Silesia, Poland, September, 14–16, 2016. – Gliwice – Katowice, Silesia, 2016. – P. 237–246.

35. Voloshchuk V. A. Effect of variation of operational regimes in building environment on results of application of exergy-based methods [Text] / V. A. Voloshchuk // The 4th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering (CPOTE-2016). Program and Proceedings, Gliwice – Katowice, Silesia, Poland, September, 14–16, 2016. – Gliwice – Katowice, Silesia, 2016. – P. 313–322.

36. Voloshchuk V. Investigations of heat engines cycles with the help of modern information technologies [Text] / V. Voloshchuk, V. Ochkov, K. Orlov, V. Znamenskiy // The 11th conference on Power System Engineering, Thermodynamics & Fluid Flow (ES-2012). Program and Proceedings, Srni, Czech Republic, June, 13–15, 2012. – Srni, 2012. Режим доступу - <http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/Srni-Voloshchuk-Etc.pdf>.

37. Voloshchuk V. Thermodynamic optimization of cycles of some schemes of gas and gas-steam turbine power plants with the help of modern IT [Text] / V. Voloshchuk, V. Ochkov, K. Orlov // The 10th conference on Power System Engineering, Thermodynamics & Fluid Flow (ES-2011). Program and Proceedings, Pilsen, Czech Republic, June, 16–17, 2011. – Pilsen, 2011. Режим доступу - http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Voloshchuk_es2011_en.html.

38. Волощук В. А. Прийняття оптимізаційних рішень в системах централізованого теплопостачання / В. А. Волощук // Проблеми економії енергії: збірник матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», – 2003. – С. 68–72.

39. Очков В. Ф. Современные информационные технологии для теплоэнергетики: облачные функции по свойствам рабочих тел, расчеты циклов паротурбинных, газотурбинных, парогазовых установок и тепловых насосов [Текст] / В. Ф. Очков, В. А. Волощук // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: тези доп. VII Міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 14–16 верес. 2011 р. – С. 27–29.

40. Волощук В. А. «Облачный» сервис для теплофизического моделирования холодильных машин и тепловых насосов [Текст] / В. А. Волощук, В. Ф. Очков, А. В. Очков // Устойчивое развитие и искусственный холод: сб. науч. тр. VIII междунар. конф. – Херсон : Д. С. Гринь, 2012. – С. 597–602.

41. Волощук В. А. Обґрунтування влаштування теплозахисту огорожувальної конструкції будівлі з урахуванням змінності погодно-кліматичного та цінового факторів / В. А. Волощук, А. М. Рокочинський // Наука і бізнес – основа розвитку економіки: тези доп. Міжнар. наук.-практ. форуму / ред. кол.: Є. М. Суліма (голова) та ін. – Д. : ДНУ, 2012. – 362 с.

42. Очков В. Ф. «Облачный» сервис для расчетов термодинамических циклов [Текст] / В. Ф. Очков, В. А. Волощук // Моделирование: XXXIII наук.-техн. конф., 15–16 січ., 2014. – Київ. – С. 24.

43. Волощук В. А. Методологічні підходи до створення низькоексергетичних систем теплозабезпечення об'єктів житлово-комунального сектору [Текст] /

В. А. Волощук // Економічна безпека територіально-виробничих комплексів: енергетика, екологія, інформаційні технології: монографія / В. А. Волощук, Т. А. Коцко, М. М. Чеховська, О. Л. Лісовські [та ін.]; за наук. ред. д-ра техн. наук, проф. С. О. Лук'яненка, канд. екон. наук, доц. Н. В. Карасвої. – Київ: МП «Леся», 2015. – 256 с.

44. Волощук В. А. Термoeкономiчне обґрунтування теплонасосної системи теплозабезпечення iз урахуванням мiнливостi погодно-клiматичних факторiв, цiн та характеристик будiвлi [Текст] / В. А. Волощук // Енергетика. Екологія. Людина: Матеріали VIII мiжнар. наук.-техн. конф. iн-ту енергозбереження та енергоменеджменту Нац. техн. ун-ту України «Київ. полiтехн. iн-т». – Київ, 2016. – С. 67–73.

45. Волощук В. А. Дослiдження термoeкономiчних характеристик комбiнованої експериментальної установкi на базi теплового насоса та сонячного колектора в умовах м. Київ [Текст] / В. А. Волощук, О. Є. Нiкiфорович, С. Юзвак // Вiдновлювана енергетика та енергоефективнiсть у XXI столiтті: робоча прогр. та тези доп. XVII Мiжнар. наук.-техн. конф., 29–30 верес. 2016 р., Київ, Україна / Нац. акад. наук України. – К.: НАН України, 2016. – С. 239–246.

46. Волощук В. А. Вплив мiнливостi погодно-клiматичного чинника на результати ексергетичної оцiнки систем теплозабезпечення будiвель [Текст] / В. А. Волощук // Актуальнi проблеми енергетики та екології: зб. пр. XVI Всеукр. наук.-техн. конф., Одеса, ОНАХТ, 5–8 жовт. 2016 р. – С. 179–181.

47. Волощук В. А. Потреби енергії та ексергії на теплозабезпечення будинкiв з рiзними теплотехнiчними характеристиками [Текст] / В. А. Волощук, А. М. Рокочинський // Нетрадицiйнi i поновлюванi джерела енергії як альтернативнi первинним джерелам енергії в рeгiонi: матерiали IX Мiжнар. наук.-техн. конф., (6–7 квіт. 2017, Львiв) / НУ «Львiв. полiтехнiка». – Львiв, 2017. – С. 265–269.

АНОТАЦІЯ

Волощук В. А. Математичне моделювання об'єктів теплоенергетики на основі термодинамічних підходів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, 2018.

Дисертацію присвячено вирішенню науково-прикладної проблеми підвищення ефективності математичного моделювання об'єктів та систем теплоенергетики, включаючи мінливість їх режимів роботи в результаті впливу випадкового характеру погодно-кліматичного чинника. Запропоновано сумісне застосування Першого та Другого законів термодинаміки та їх поєднання з економічним та екологічним оцінюванням (методи прикладної термодинаміки), а також відповідне інформаційне забезпечення програмної реалізації алгоритмів під час обґрунтування параметрів, структур і типу таких систем для підвищення їх ефективності.

Для реалізації математичного моделювання на основі методів прикладної термодинаміки у разі вибору параметрів, структур і типу систем теплозабезпечення

будинків використано в результаті наукового обґрунтування динамічний підхід із подальшим визначенням сезонних показників та критеріїв.

На основі моделювання виконано термодинамічну оптимізацію газотурбінних та парогазових теплоенергетичних установок за рахунок використання поняття «зразковий термодинамічний цикл», що забезпечило обґрунтування структури та параметрів таких установок для підвищення їх енергетичного ККД.

Удосконалено технологію моделювання теплоенергетичних процесів за рахунок застосування «хмарних» обчислювальних сервісів зі збирання, зберігання, оброблення даних, що забезпечує реалізацію відкритих інтерактивних алгоритмів із числового дослідження систем теплоенергетики та теплофізичних властивостей робочих тіл.

Розвинені та вдосконалені наявні методи і засоби моделювання теплоенергетичних систем забезпечило створення методик, алгоритмів, комп'ютерних програм та Інтернет-ресурсів, які використовують у виробничій діяльності корпорації «Європейська енергетична компанія» та ПРАТ «Білоцерківська ТЕЦ» під час обґрунтування рішень на стадії проектування та модернізації систем, а також упроваджують у навчальний процес для викладання низки дисциплін та виконання магістерських робіт студентами енергетичних спеціальностей Національного університету водного господарства та природокористування та КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Ключові слова: моделювання, об'єкт теплоенергетики, термодинамічний аналіз, відкрита інтерактивна розрахункова база даних.

ANNOTATION

Voloshchuk V. A. Mathematical modeling of thermal installations based on thermodynamic approaches. – Manuscript.

Thesis for doctor degree of technical sciences by speciality 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. – Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv, 2018.

The dissertation thesis contains the solution of the actual scientific and technical problem, namely: improvement of mathematical modeling of thermal systems including variation of operational modes within such systems due to stochastic weather and climatic influences. It is proposed to apply the First law of thermodynamics together with the Second law and their combination with economic and ecological evaluation (exergetic methodology). Also appropriate information provision for programming algorithms implementation is developed for substantiation of parameters, structures and types of such systems with the purpose of increasing their efficiency.

In mathematical modeling for the purpose of decision-making support in community heating systems exergetic methodology was applied based on dynamic approach with further calculations of seasonal parameters.

Based on modeling, thermodynamic optimization of gas turbine power and gas-steam combined power plants is performed using the concept of exemplary cycle which has provided substantiation of the structure and parameters of such systems with the purpose of increasing their efficiency.

Methodology of mathematical modeling of thermal processes is improved based on the application of cloud services for collection, storage and processing of data, which allows implementing open, interactive algorithms for computing thermal systems and thermophysical properties of working fluids.

The developed and improved methods and tools for modeling of thermal systems have provided creation of methods, algorithms, computer programs and Internet resources which are used by Corporation “European energy company” and PRAT "Bilotserkivska teploelektrotsentral" for decision-making processes at phases of system design or modernization, and are also implemented into thermal engineering programs in the National University of Water and Environmental Engineering and National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.

Keywords: modeling, thermal installation, thermodynamic analysis, open interactive database for calculations.

Підписано до друку 25.04.2018 р. Формат 60×90¹/₁₆.
Ум.-друк. арк. 1,9. Тираж 100 прим.
Зам. № 5356.

*Видавець і виготовлювач
Національний університет
водного господарства та природокористування,
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028.*

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного
реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції РВ № 31 від 26.04.2005 р.*