

Відгук офіційного опонента

завідувача кафедри системного аналізу, комп'ютерного моніторингу та інженерної графіки
Вінницького національного технічного університету МОН України,
доктора технічних наук, професора Мокіна Віталія Борисовича
на дисертаційну роботу Волощука Володимира Анатолійовича за темою «Математичне
модельовання об'єктів теплоенергетики на основі термодинамічних підходів», поданою на
здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне
модельовання та обчислювальні методи

Відгук підготовлено за матеріалами дисертації, яка має вступ, 5 розділів та 5 додатків, серед яких – документи про впровадження та апробацію результатів дисертації. Повний обсяг дисертації – 371 сторінка, з яких основний зміст викладено на 297 сторінках друкованого тексту. Робота містить 120 рисунків, 19 таблиць і список використаних джерел з 260 найменуваннями на 29 сторінках.

1. Актуальність обраної теми

Останнім часом, при модельованні теплоенергетичних процесів, спостерігається підвищений інтерес до методів сумісного застосування Першого та Другого законів термодинаміки. При цьому, найбільш динамічно розвивається так званий метод ексергетичного аналізу, поєднання якого із методами економічного та екологічного оцінювання теплоенергетичних систем має велике практичне значення. Наприклад, згідно бази даних ScienceDirect, починаючи 1994 р. по 2017 р., кількість щорічних публікацій присвячених застосуванню методів ексергетичного аналізу зросла від 116 до 2475 (<https://www.sciencedirect.com/search?q=exergy&authors=&pub=&volume=&issue=&page=&origin=home&zone=qSearch>). На відміну від існуючої методології, модельовання із застосуванням тільки Першого закону термодинаміки, що є частковим випадком закону збереження та перетворення енергії, методи ексергетичного аналізу забезпечують визначення місця, значення, причини, вартості та негативного впливу на довкілля термодинамічних втрат (самовільна передача теплоти від теплоносія з вищою температурою до теплоносія із нижчою температурою, дифузія, горіння, тертя тощо) у теплоенергетичній системі.

Разом із тим, створення та застосування моделей на основі сумісного застосування Першого та Другого законів термодинаміки і їх поєднання із економічним та екологічним оцінюванням реалізовано, в більшості випадків, тільки для систем промислової теплоенергетики та хімічної галузі. Модельовання систем тепло- та холодопостачання будинків на основі ексергетичного підходу потребує врахування ряду особливостей: мінливість режимів роботи через вплив погодно-кліматичних факторів, досить висока чутливість та нелінійність ексергетичних параметрів відносно погодно-кліматичних факторів, які, у свою чергу, змінюються випадковим чином. Більше того, отримані дослідниками раніше закономірності зазнали змін, через зміни клімату, а отже, потребує перегляду уся система тепло- та холодопостачання або розроблення моделей та методів їх ідентифікації, які будуть більш гнучко адаптуватись до таких змін.

Перспективний напрям розвитку енергетики пов'язаний із газотурбінними та парогазовими енергетичними установками. Шляхи підвищення термодинамічної ефективності таких установок до кінця ще не досліджені і становлять складну багатопараметричну проблему, яку, в багатьох випадках, можна вирішити за допомогою модельовання.

З огляду на це, актуальною залишається проблема розроблення методів та засобів модельовання та оптимізації теплоенергетичних систем, які працюють і у змінних режимах роботи через випадковий вплив погодно-кліматичних факторів, що узагальнює отримані раніше результати і передбачає під час створення й реалізації математичних моделей сумісне застосування методів ексергетичного аналізу та їх поєднання із економічним та екологічним оцінюванням.

Мета дисертаційної роботи – підвищення ефективності математичного моделювання об'єктів та систем теплоенергетики, включаючи мінливість їх режимів роботи в результаті впливу випадкового характеру погодно-кліматичного чинника, на основі сумісного застосування Першого та Другого законів термодинаміки, а також за рахунок відповідного інформаційного забезпечення.

Дисертація виконувалася згідно до планів науково-дослідних робіт кафедри атомних електричних станцій і інженерної теплофізики теплоенергетичного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та Інституту гідромеханіки Національної академії наук України. Проведене дисертаційне дослідження відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки в Україні на період до 2020 року: «Енергетика та енергоефективність».

2. Аналіз основного змісту дисертації

Зміст роботи відповідає сформульованим задачам. Проведені дослідження відповідають паспорту спеціальності 01.05.02 - «Математичне моделювання та обчислювальні методи» і спрямовані на підвищення ефективності застосування термодинамічних підходів та на створення й реалізацію на їх основі математичних моделей об'єктів і систем теплоенергетики, включаючи мінливість їх режимів роботи в результаті впливу випадкового характеру погодно-кліматичного чинника.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків щодо основних результатів роботи, списку використаних джерел та додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, мету, завдання досліджень, зазначено її зв'язок з науковими програмами, планами та темами, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, сформульовано отримані нові наукові результати, що виносяться на захист, та їх практичне значення, надано інформацію про їх впровадження, апробацію та публікування.

У першому розділі, на основі огляду як вітчизняних, так і закордонних літературних джерел, проведено аналіз сучасного стану та визначено шляхи подальшого розв'язання науково-прикладної проблеми з удосконалення методів та методології математичного моделювання об'єктів теплоенергетики на основі термодинамічних підходів. Автором обґрунтовані передумови необхідності зміни методологічних підходів з реалізації математичного моделювання об'єктів теплоенергетики, зокрема систем теплозабезпечення будівель, які характеризуються мінливим характером режимів роботи через вплив погодно-кліматичного фактора. В якості методологічного ядра створення математичних моделей дисертантом запропоновано використовувати поняття «ексергія». Ексергетичний, економічний та екологічний аналіз запропоновано реалізувати на основі алгебраїчного підходу з використанням методу питомої ексергетичної вартості та негативного впливу на довкілля (SPECO-метод). 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. З метою удосконалення технології реалізації алгоритмів математичних моделей на основі методів прикладної термодинаміки дисертантом запропоновано використовувати можливості сучасних веб-технологій, у т.ч. «хмарні» розрахунки.

У другому розділі розглянуто методологічні підходи до енергетичного та ексергетичного аналізу будівлі як ключового елемента системи теплозабезпечення. Автором, на основі реалізації математичної моделі, проведений аналіз комплексного впливу метеорологічних факторів на енергетичний баланс будівлі і виявлено роль прихідної частини енергетичного балансу за рахунок проникаючої через прозоре огороження сонячної радіації. В роботі визначено, що у разі впровадження в будівлях заходів з енергоефективності, спостерігається зростання показника мінливості потреб енергії та ексергії на створення теплового комфорту у будівлях як протягом опалювального періоду, так і у багаторічному перерізі. У свою чергу, це призводить до зростання невизначеності критеріїв вибору техніко-

технологічних рішень у цих системах. Автором розроблено та реалізовано методи оцінювання впливу ймовірнісного характеру зміни погодно-кліматичних умов на потреби ексергії, параметри природної вентиляції будинку, а також на невизначеність параметрів приведенного опору теплопередачі огорожувальної конструкції будівлі.

У третьому розділі реалізовано моделювання теплонасосних системи теплозабезпечення будівель на основі поєднання ексергетичного, ексергоекономічного, ексергоприродничого підходів. Автором запропоновано математичну модель з дослідження режимів роботи теплонасосної установки, що, у свою чергу, забезпечило реалізацію моделі поглибленого ексергетичного, ексергоекономічного та ексергоприродничого аналізу системи. Дисертантом запропоновано здійснювати реалізацію оцінювання системи на основі динамічного підходу з подальшим обґрунтуванням її параметрів та структури за допомогою сезонних показників ексергетичного аналізу. В розділі, на основі одночасного застосування ексергетичного, ексергоекономічного та ексергоприродничого оцінювання, запропоновано обґрунтування параметрів системи теплозабезпечення будинку на базі теплонасосної установки з метою підвищення енергетичної, економічної та екологічної ефективності.

У четвертому розділі розглянуто удосконалення методу термодинамічної оптимізації газотурбінних та парогазових теплоенергетичних установок, завдяки використанню поняття «зразковий термодинамічний цикл». Автор, на основі сформованого критерію оптимізації (внутрішнього ККД термодинамічного циклу) створив та реалізував алгоритми з моделювання цих установок. Для отримання попередніх, оціночних, результатів дисертантом спочатку створені та реалізовані математичні моделі вказаних установок без урахування зміни складу робочого тіла та втрат тиску у компонентах установок. Потім, використовуючи отримані результати, реалізована оптимізація параметрів та структури газотурбінних та парогазових теплоенергетичних установок з урахуванням зміни складу робочого тіла та втрат тиску у компонентах установок.

У п'ятому розділі запропоновано інформаційне забезпечення реалізації математичних моделей теплоенергетичних процесів у відповідності до розроблених та удосконалених автором методів. Шляхом застосування подвійної сплайнової інтерполяції табличних даних, з урахуванням ліній розривів та зламів функціональних залежностей, автором реалізовано алгоритм ідентифікації як прямих, так і обернених функцій для визначення теплофізичних властивостей робочих тіл. Розроблено та реалізовано на конкретних прикладах відкриті інтерактивні алгоритми з моделювання об'єктів теплоенергетики шляхом створення в мережі Інтернет за допомогою комп'ютерних програм відповідної бази даних. Створені засоби розрахунку та моделювання теплоенергетичних процесів розміщено на сайтах Інтернет-спільнот та форумах.

3. Цінність дисертаційної роботи для науки

Теоретичне значення дисертаційної роботи полягає в розвитку методологічних основ математичного моделювання теплоенергетичних систем та об'єктів, зокрема систем теплозабезпечення будівель, що працюють у змінних режимах роботи через випадковий характер впливу погодно-кліматичного чинника, а також газотурбінних та парогазових установок, що базується на сумісному застосування як Першого, так і Другого, законів термодинаміки та їх поєднанні з економічним та екологічним оцінюванням. В сукупності, отримані результати є новим системно викладеним, науково-обґрунтованим вирішенням складної науково-прикладної проблеми, що має важливе господарське значення для одночасного підвищення енергетичної, економічної та екологічної ефективності теплоенергетичних систем при отриманні заданого продукту.

4. Нові науково-обґрунтовані результати:

Вперше здобувачем:

- 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, включаючи їх мінливість або невизначеність, для обґрунтування впровадження енергоефективних заходів у системі вентиляції будинку з урахуванням змін режимів природної вентиляції;

- розроблено метод із визначення критеріїв обґрунтування параметрів приведеного 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 та мінливість або невизначеність цих критеріїв;

Удосконалено здобувачем:

- 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.

5. Практична користь роботи

Найбільшу практичну цінність мають такі одержані у дисертації результати:

- обґрунтовано 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;

- дістала подальший розвиток здобувачем 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;

- впровадження запропонованих автором методів врахування впливу випадкового характеру метеорологічних факторів забезпечує суттєве уточнення (до 30 %) параметрів та критеріїв теплозабезпечення будівлі (потреб ексергії для створення теплового комфорту всередині будинку; параметрів природної вентиляції будинку та критеріїв обґрунтування впровадження енергоефективних заходів у системі вентиляції будинку; критеріїв обґрунтування теплозахисту огорожувальної конструкції будівлі) у порівнянні із існуючими методами, а також дає можливість оцінити невизначеність цих параметрів та критеріїв через

мінливий вплив погодно-кліматичного чинника;

- реалізація запропонованого комплексного ексергетичного, ексергоекономічного та ексергоприродничого аналізу систем теплозабезпечення будівель на базі теплонасосної установки дала змогу виявити способи одночасного підвищення енергетичної (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), економічної (зниження річної ексергетичної вартості кінцевого «продукту» системи до 3,5 %) та екологічної (зменшення річного негативного впливу на довкілля «продукту» системи до 40 %) ефективності такої системи;

- на основі запропонованого алгоритму термодинамічної оптимізації газотурбінних та парогазових теплоенергетичних установок обґрунтовано структуру та параметри цих установок із забезпечення підвищення внутрішнього ККД автономної безрегенеративної газотурбінної установки до 42-44 %, а парогазової установки з колом-утилізатором – до 50-60 %;

- розроблені та реалізовані відкриті інтерактивні алгоритми з моделювання та оптимізації об'єктів теплоенергетики передбачають не тільки Desktop-ний варіант, але й реалізацію інтерактивних розрахунків з використанням «хмарних» веб-ресурсів;

- створена в мережі Інтернет за допомогою комп'ютерних програм відповідна база даних може використовуватися для подальшого розвинення та реалізації моделювання й оптимізації інших техніко-технологічних схем теплоенергетичних процесів;

- наукові результати роботи спрямовані на широке застосування методів прикладної термодинаміки у навчальному процесі при підготовці фахівців з теплоенергетики, а також на виробництві, і сприяють розвитку інтуїції та творчого потенціалу інженерів-проектувальників, оскільки забезпечують адекватне обґрунтування як параметрів, так і структури теплоенергетичних систем.

6. Оцінка достовірності та обґрунтованості результатів

Обґрунтованість висновків і одержаних результатів дисертаційної роботи базується на використанні фундаментальних законів термодинаміки, методів теорій ймовірностей та математичної статистики до розгляду досліджуваної проблеми, пов'язаної з розвитком методології математичного моделювання об'єктів та систем теплоенергетики, достатньо повного врахування факторів впливу та формалізації взаємозв'язку між компонентами систем. Отримані автором наукові результати відповідають поставленим задачам досліджень та підтверджуються їх достатньою апробацією на науково-технічних конференціях і семінарах.

Достовірність результатів дисертації підтверджується математичною коректністю поставлених задач і збігом теоретичних припущень з результатами комп'ютерного моделювання; несуперечністю відомих і запропонованих у роботі теоретичних і практичних положень та закономірностей. Достовірність отриманих результатів також підтверджується їх впровадженням, у т.ч. у виробничу діяльність корпорації «Європейська енергетична компанія» та ПРАТ «Білоцерківська ТЕЦ» під час обґрунтування рішень на стадії проектування та модернізації систем теплозабезпечення; у навчальний процес для викладання низки дисциплін та виконання магістерських робіт студентами енергетичних спеціальностей Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та Національного університету водного господарства та природокористування та (довідки про впровадження відповідно від 08.09.2017 р. та 12.09.2017 р.).

7. Повнота викладення основних матеріалів дисертації в опублікованих працях

Наукові публікації достатньо повно висвітлюють основні наукові положення дисертації. За темою роботи опубліковано 47 наукових праць, з яких 1 монографія (у видавництві Springer і включена до наукометричної бази Scopus), 25 статей у наукових

фахових виданнях (із них 9 статей у періодичних виданнях іноземних держав, 2 із яких входять до наукометричної бази Scopus, 3 у періодичних виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз), 17 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій (із них одна входить до наукометричної бази Scopus) та 4 статті опубліковано в інших виданнях, 11 статей опубліковано одноосібно.

8. Автореферат дисертації

Автореферат дисертації по своєму змісту відповідає матеріалам дисертаційної роботи.

9. Зауваження щодо змісту дисертації та автореферату

1. При реалізації запропонованого автором на основі теорії ймовірностей методу врахування впливу випадкового характеру метеорологічних факторів у випадку визначення енергетичних, ексергетичних та економічних характеристик будинку використовуються функції розподілу випадкових величин (с. 133, 138). Разом з тим, в роботі немає перевірки статистичних гіпотез про прийняті закони розподілу.

2. При створенні функцій із визначення теплофізичних властивостей робочих тіл на основі сплайнової інтерполяції (п. 5.2), автором не показано вибір розрахункового кроку табличних даних, на основі яких була реалізована інтерполяція. Інтервал табличних даних впливає на точність інтерполяції. Крім того, при відносно високому градієнті сплайнова інтерполяція може призвести до осциляції.

3. Не достатньо обґрунтовано вибір програмного забезпечення для реалізації розроблених методів та алгоритмів у вигляді Mathcad чи Mathcad Prime, які, безсумнівно, є дуже гарним засобом для вирішення поставлених задач, але й досить дорогим – розроблений та оптимізований в пакеті Mathcad матапарат потім доцільно було б реалізувати з використанням відкритого програмного забезпечення з численними бібліотеками, наприклад на Python, що значно розширило б сферу його застосування.

4. У роботі використовується багато визначень ефективності систем, методів та технологій (як на рівні окремих їх елементів, так і на рівні узагальнених понять, на кшталт енергоефективності), натомість, було б доцільним сформулювати один комплексний критерій ефективності з урахуванням ексергетичних, економічних та екологічних показників та критеріїв і на його прикладі показати кількісно як саме розроблені методи та технології дозволили покращити цю ефективність на ряді прикладів.

5. На створені програми та бази даних варто було б отримати свідоцтва про реєстрацію авторського права на комп'ютерні програми, причому до викладення їх у спільний доступ в Інтернет.

6. В дисертації недостатньо уваги приділено представленню у додатках допоміжного матеріалу, необхідного для повноти сприйняття роботи: описів та текстів створених алгоритмів і комп'ютерних програм, проміжних та додаткових результатів числового моделювання та іншого ілюстративного матеріалу.

7. В роботі зустрічаються орфографічні і граматичні помилки, навіть, у базових поняттях, наприклад «Ексергоекномічного» (с. 287), «Ексергетичний» (с. 311) тощо.

10. Відповідність дисертації встановленим вимогам та загальна оцінка дисертації

Наведені зауваження суттєво не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, не ставлять під сумнів основні теоретичні положення і отримані науково-практичні результати.

Дисертація Волощука В.А. є завершеним науковим дослідженням, в якій вирішена важлива науково-прикладна проблема удосконалення методів і засобів моделювання теплоенергетичних систем, включаючи мінливість їх режимів у результаті впливу випадкового характеру погодно-кліматичного чинника. Сукупність наукових положень, які сформульовані та обґрунтовані в дисертаційній роботі, мають практичну значущість, що підтверджується відповідними документами про використання та впровадження результатів.

За актуальністю теми, мірою обґрунтованості наукових положень, достовірністю, новизною, теоретичною та практичною цінністю одержаних результатів дисертаційна робота Волощука Володимира Анатолійовича на тему «Моделювання об'єктів теплоенергетики на основі термодинамічних підходів» повністю відповідає вимогам до дисертацій та авторефератів дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, зокрема, п. п. 9, 10 та 12–14 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вчених звань старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р. (зі змінами), та паспорту спеціальності 01.05.02 – «Математичне моделювання та обчислювальні методи», а Волощук Володимир Анатолійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 01.05.02 – «Математичне моделювання та обчислювальні методи».

Офіційний опонент,

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри системного аналізу,
комп'ютерного моніторингу та
інженерної графіки
Вінницького національного
технічного університету



В. Б. Мокін

