

## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

професора Бомби Андрія Ярославовича на дисертаційну роботу

Волощука Володимира Анатолійовича

### **«Математичне моделювання об'єктів теплоенергетики на основі термодинамічних підходів»,**

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

#### **Актуальність теми дослідження.**

Моделювання та аналіз теплоенергетичних установок зазвичай обмежується складанням і використанням енергетичних балансів, заснованих на Першому законі термодинаміки – законі збереження енергії. Такі баланси виражають кількісні характеристики теплоенергетичних процесів, на основі яких визначаються такі величини як продуктивність установок, витрати енергоносіїв, ефективність, тощо. Однак енергетичні баланси не враховують якісних характеристик реальних теплоенергетичних процесів, зумовлених проявами необоротності, та енергетичну цінність ресурсів різної фізичної природи. Необоротність завжди знижує енергетичну ефективність реальних процесів, причому ознаки й міра необоротності встановлюються Другим законом термодинаміки – законом генерації ентропії. Тому моделювання теплоенергетичних процесів при сумісному використанні обох законів термодинаміки, що враховує не тільки кількісні, але і якісні особливості енергопотоків і енергоносіїв, є науково обґрунтованою основою для дослідження теплоенергетичних об'єктів, які можуть працювати як у змінних, так і у мінливих режимах роботи.

Реалізація такого підходу також вимагає створення відповідної інформаційної бази, яка була б зручною у користуванні, легкодоступною та використовувала сучасні Інтернет-технології.

У зв'язку з цим **актуальною** є мета роботи, пов'язана з розвитком методології математичного моделювання ціленаправлено стосовно підвищення ефективності функціонування об'єктів та систем теплоенергетики.

Для досягнення сформульованої мети у роботі поставлені і розв'язані такі науково-прикладні задачі:

- проаналізовано наявну методологію створення й реалізації математичних моделей з дослідження об'єктів і систем теплоенергетики, включаючи мінливість їх режимів роботи в результаті впливу випадкового характеру погодно-кліматичного чинника, і обґрунтовано необхідність подальшого вдосконалення методів моделювання на основі сумісного застосування Першого та Другого законів термодинаміки;

- розроблено та удосконалено методи і програмну реалізацію відповідних алгоритмів з комплексного енергетичного, економічного та екологічного аналізу параметрів та критеріїв систем теплозабезпечення будинків з урахуванням мінливого характеру режимів роботи таких систем через вплив погодно-кліматичного фактора та взаємозв'язку між їх компонентами;

- розвинено метод термодинамічної оптимізації газотурбінних і парогазових теплоенергетичних установок завдяки використанню поняття «зразковий термодинамічний цикл» та реалізовано програмну реалізацію алгоритму обґрунтування параметрів та структури цих перспективних теплоенергетичних установок;

- розроблено та реалізовано відкриті інтерактивні алгоритми з моделювання об'єктів теплоенергетики, включаючи визначення теплофізичних властивостей робочих тіл, через створення в мережі Інтернет за допомогою комп'ютерних програм відповідної бази даних для забезпечення збирання, зберігання, оброблення даних із використанням сучасних математичних методів розрахунків і оптимізації;

- реалізовано 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.

Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки на період до 2020 року «3) енергетика та енергоефективність» відповідно до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» від 11.07.2001 р. № 2623-III.

#### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, їх достовірність**

Вірогідність основних наукових положень і результатів забезпечується використанням науково обґрунтованих математичних постановок задач дослідження термодинамічної ефективності та її впливу на економічні та екологічні характеристики у процесах передачі та перетворення енергії теплоенергетичних систем. Достовірність отриманих результатів підтверджується також співпадінням на достатньому рівні теоретичних висновків з результатами числових розрахунків на основі статистичного матеріалу. Частина результатів узгоджується з тими, що одержані при проведенні аналогічних досліджень і відомі з літературних джерел.

#### **Новизна наукових положень дисертаційного дослідження**

Серед нових наукових результатів доцільно, зокрема, виділити:

- розроблення методів врахування впливу випадкового характеру метеорологічних факторів у разі 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;

- удосконалення методу комплексного аналізу та обґрунтування параметрів системи теплозабезпечення будинку на базі теплонасосної установки шляхом одночасного застосування ексергетичного, ексергоекономічного та ексергоприродничого оцінювання, що у свою чергу забезпечило реалізацію моделі з підвищення енергетичної, економічної та екологічної ефективності системи;

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

- адаптація методу для визначення теплофізичних властивостей робочих тіл на основі табличних даних за допомогою подвійної сплаймової інтерполяції з урахуванням так званих «розривних ділянок (композицій)» та зламів функціональних залежностей, що дозволило створити як прямі так і зворотні функції для моделювання теплофізичних властивостей робочих тіл.

**Практичне значення отриманих результатів та можливі шляхи використання результатів дослідження:**

- розроблено алгоритми реалізації запропонованих методів 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. Отримані результати показали, що застосування динамічного підходу для врахування мінливого характеру впливу погодно-кліматичного чинника забезпечує суттєве уточнення (до 30%) енергетичних, ексергетичних та економічних характеристик будівлі у порівнянні із існуючими методами на основі стаціонарного підходу. Крім того, показано, що, через вплив випадкового характеру метеорологічних факторів, має місце невизначеність відповідних критеріїв обґрунтування рішень (наприклад, терміни окупності впровадження енергоефективних заходів може коливатися в межах 3-х і більше років).

- створено алгоритм реалізації комп'ютерної моделі комплексного ексергетичного, ексергоекономічного та ексергоприродничого аналізу систем теплозабезпечення будівель на базі теплонасосної установки із застосування

динамічного підходу. Показано, що, порівняно з наявними, найбільш розповсюдженими технологіями, можливостей підвищення ефективності використання ексергії первинного енергоносія в ТНУ ще на 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 %;

- застосування розроблених алгоритмів термодинамічної оптимізації газотурбінних та парогазових теплоенергетичних установок з обґрунтування їх структури та параметрів забезпечило підвищення внутрішнього ККД автономної безрегенеративної газотурбінної установки до 42...44 %, а парогазової установки з колом-утилізатором – до 50...60 %;

- запропоновано відкриті інтерактивні підходи 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 адаптації методу подвійної сплаймової інтерполяції, що дозволило створити як прямі, так і обернені функції для моделювання теплофізичних властивостей таких робочих тіл: фреонів R22, R134a, R407c, R410a, аміаку та вуглекислоти;

- результати досліджень дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес для викладання низки дисциплін та виконання магістерських робіт студентами енергетичних спеціальностей, у виробничій діяльності, а також в межах реалізації ряду міжнародних проектів, про що засвідчують відповідні акти впровадження.

### **Оцінка змісту дисертації**

Дисертаційна робота складається із вступу, основної частини, яка містить п'ять розділів, висновків, переліку літератури та додатків.

На основі огляду існуючих робіт проаналізовано стан розвитку математичного моделювання стосовно проблеми розробки, удосконалення та використання принципово нових методів досліджень об'єктів теплоенергетики, включаючи мінливість режимів їх роботи через випадковий характер впливу погодно-кліматичного чинника, які базуються на сумісному застосуванні Першого та Другого законів термодинаміки та їх поєднання із економічним та екологічним оцінюванням – методів прикладної термодинаміки або методів ексергетичного аналізу (перший розділ).

Далі, у другому розділі, пропонуються авторські підходи до оцінювання енергетичних, ексергетичних та економічних характеристик будівлі, як ключового елемента систем теплозабезпечення, з урахуванням змінних режимів роботи через випадковий характер погодно-кліматичного чинника.

У наступному, третьому, розділі, на основі застосування запропонованих автором методів з оцінювання енергетичних та ексергетичних характеристик будівлі, побудовані та реалізовані моделі для комплексного (ексергетичного, економічного та екологічного) аналізу системи теплозабезпечення будівель на базі теплонасосних установок з урахуванням мінливих режимів роботи та взаємозв'язку між компонентами системи. На основі обґрунтованих і запропонованих автором так званих «річних критеріїв» обґрунтування рішень, що базуються на застосуванні методів прикладної термодинаміки, здійснена оптимізація системи із одночасним врахуванням енергетичних, економічних та екологічних вимог.

У четвертому розділі дисертантом розроблено та реалізовано математичні моделі термодинамічної оптимізації «зразкових» циклів (тобто таких, реальне здійснення яких забезпечує досягнення максимуму внутрішнього ККД) газотурбінних та парогазових теплоенергетичних установок. Показано та на основі існуючих літературних джерел щодо діючих установок підтверджено,

що за рахунок ускладнення циклу (застосування в газотурбінній установці багатоступеневого стиснення повітря з проміжним його охолодженням та багатоступеневого розширення газу з проміжним підводом теплоти), збільшення 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 достатньо добре узгоджуються із даними діючих установок.

Хороше, що у кінцевому (п'ятому розділі) представлено сформоване автором відкрите, інтерактивне середовище, яке базується на залученні мережі Інтернет для широкого впровадження на практиці методології сучасної прикладної термодинаміки при моделюванні систем теплоенергетики. Таке середовище підтримує збір, зберігання, забезпечення обробки даних та використовує сучасні математичні методи розрахунків й оптимізації.

У висновках викладено основні наукові й практичні результати. З висновками погоджуюсь.

Структура дисертації логічна, відповідає меті та поставленим у роботі завданням. Наукові терміни у роботі вжиті коректно. Пояснення у тексті супроводжуються необхідною кількістю рисунків, таблиць та математичними викладками. На всі рисунки, таблиці, а також літературні джерела, є посилання у тексті. Робота виконана на належному теоретичному рівні, а її обсяг відповідає змістовному наповненню.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, яка за структурою, мовою та стилем написання відповідає вимогам ДАК МОН України.

**Висновок про повноту опублікування основних положень дисертації, аналіз автореферату**

Результати роботи опубліковано у 47 наукових працях, у тому числі 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, в тому числі 2 статті входить 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 в інших виданнях.

Основні наукові положення та висновки дисертаційної роботи ідентичні наведеним у авторефераті.

**Наукові положення та результати, які виносилися на захист кандидатської дисертації «Дослідження гідравлічних опорів і гідравлічні розрахунки трубопроводі з дискретно змінними витратами уздовж потоку» (2001 рік) за спеціальністю 05.23.16 – «гідравліка та інженерна гідрологія», яка була захищена в спеціалізованій раді при Рівненському державному технічному університеті, не використовуються в поданій докторській дисертації.**

Розглянута дисертація та автореферат викликають деякі **зауваження**. Відзначу наступні:

1. У матеріалі дисертації не зовсім конкретно та наглядно для сприйняття більш широким колом читачів висвітлено термін «ефективність». Хоча, глибоко вникаючи в суть тексту з урахуванням індивідуальних бесід із здобувачем, все це стає більш зрозумілим.

2. Не завжди є зрозумілим чи удосконалення запропонованих моделей призначене для кращого опису процесів (розуміння, виявлення факторів, що впливають на вихід енергії за межі системи), чи це забезпечує покращення ситуаційних станів (зменшення затрат первинної енергії для забезпечення відповідних потреб тощо)?

3. У деяких випадках (як, наприклад, у розділі 3) автор є надто категоричним у своїх твердженнях. Він часто говорить про удосконалення ним моделей теплоенергетичних процесів, проте не зовсім зрозуміло, що під цим терміном мається на увазі. Адже існує широкий спектр моделей, що характеризують різні аспекти. Не завжди зрозуміло, в якому сенсі покращується модель.



4. На наш погляд, у розділі 3, недостатньо уваги приділено ідентифікації параметрів запропонованих моделей, що є надзвичайно важливим. Адже чого варті нові моделі, якщо автори не знають де брати відповідні параметри і наскільки вони є точними? Ці питання також є важливими при обґрунтуванні адекватності запропонованих моделей.

5. Хороше, що автор не квапиться створювати складні моделі на основі застосування нелінійних систем диференційних рівнянь за умов невизначеності. Адже бажання створити та розв'язати «сходу» складні математичні моделі часто змушує відмовлятися від врахування низки важливих факторів та вимагає багато затрат для комп'ютерної реалізації. Разом з тим, доцільно було б хоч якось окреслити шляхи переходу від запропонованих алгебраїчних моделей (достатньо широких і зручних як для опису процесів так проведення комп'ютерного моделювання) до більш загальних та абстрактних моделей.

6. В тексті дисертації було замічено декілька описок, зокрема комп'ютерного характеру. Деякі графіки (наприклад, на рис. 5.37, 5.38 та 5.43) варто було б представити більш чіткіше. На нашу думку, в назві роботи слово «математичне» є зайвим (хіба що словосполучення «математичне моделювання» було б добре замінити на «комп'ютерне моделювання»).

Ці зауваження суттєво не впливають на позитивну оцінку виконаної здобувачем роботи, її наукову новизну і зацікавленість та добре враження від викладення дисертантом матеріалу його досліджень.

#### **Загальний висновок**

У дисертаційній роботі Волощука В.А. розв'язана важлива науково-технічна проблема розвинення теорії математичного моделювання систем теплоенергетики, в тому числі і з урахуванням мінливості їх режимів роботи через вплив погодно-кліматичного фактора, на основі комбінованого використання Першого та Другого законів термодинаміки та їх поєднання із економічним та екологічним оцінюванням.

Структура та об'єм тексту відповідають встановленим для докторських дисертацій вимогам. Плагіат не прослідковується.

Дисертаційна робота Волощука В.А. на тему «Математичне моделювання об'єктів теплоенергетики на основі термодинамічних підходів», подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, відповідає вимогам п. п. 9, 10 та 12–14 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а здобувач заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук.

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри інформатики та прикладної  
математики Рівненського державного  
гуманітарного університету

Бомба А. Я.

