

ВІДГУК  
офіційного опонента на дисертаційну роботу

ВОЛОЩУКА ВОЛОДИМИРА АНАТОЛІЙОВИЧА на тему  
«МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ  
ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВІ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПІДХОДІВ»,  
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 01.05.02 – Математичне моделювання та  
обчислювальні методи

***1. Актуальність теми дисертаційної роботи***

Одним з перспективних шляхів вирішення проблеми енергозбереження є застосування систем термотрансформації, що використовують нетрадиційні поновлювані джерела енергії. Отримана в процесі термотрансформації теплота більш високого потенціалу може бути використана в системах тепло- і холодопостачання як житлових, громадських, так і промислових об'єктів. Робота цих систем характеризується високою енергетичною ефективністю, екологічною чистотою, високою надійністю, можливістю комбінованого виробництва тепла і холоду в єдиній установці, універсальністю за тепловою потужністю та за видом низькопотенційної енергії. На думку багатьох фахівців для забезпечення зазначених якостей системи термотрансформації мають бути спроектовані з використанням сучасних методів термодинамічного аналізу та оптимізації. Науковою основою цих методів є поняття ексергії системи, тобто здатності даної системи виробляти роботу в умовах певного термічного стану навколишнього середовища. Об'єктами практичної реалізації методу є не тільки замкнуті системи перетворення енергії і речовини, в яких енергетичний баланс включає теплоту і роботу, а й відкриті технічні системи (енерготехнологічні). Для відкритих систем ексергетичний метод дозволяє оцінювати із загальних позицій потоки енергії, а також енергетичну цінність запасів будь-якої речовини. В ексергетичному методі використовується класичний апарат технічної термодинаміки спільно з елементами теорії систем та економіки. На сьогодні метод ексергетичного аналізу є найбільш ефективним щодо визначення шляхів скорочення втрат від незворотності та загальної вартості установки як при її створенні, так і при подальшій експлуатації.

Методологічні основи сучасної прикладної термодинаміки були закладені видатними вченими, серед яких слід відзначити В. М. Бродянского, Я. Шаргута, А. Бежана, А. І. Андрющенко, Д. П. Гохштейна. Роботи вказаних авторів, що виконані у кінці 60-х на початку 70-х років 20 століття, зараз складають «золотий фонд» термодинамічного аналізу. Українські вчені досить довгий час були осторонь від сучасних розробок закордонних вчених в галузі прикладної термодинаміки. Тому, пропустивши всі дискусійні питання 70–80 років щодо доцільності використання такого поняття як ексергія при розробці методів аналізу ефективності та оптимізації теплотехнічних систем, пропонується прийняти це як факт, що відбувся у сучасній термодинаміці.

Таким чином, ексергія, як міра практичної придатності енергії, служить єдиною основою щодо оцінки впливу на економічні показники термодинамічних параметрів енергоперетворюючих систем, характеризуючи неефективність термодинамічних процесів додатковими фінансовими витратами.

Введення в сучасну термодинаміку елементів економіки змінило самі критерії ефективності технічних систем, оскільки в цьому випадку умовою оптимальності їх параметрів став не максимум ККД, а мінімум зведених витрат технічної системи. На думку видатного вченого термодинаміка Адріана Бежана: «Термоекономіка є найвищою дисципліною в ієрархії дисциплін сучасної прикладної термодинаміки, яка поєднує в собі безпосередньо технічну термодинаміку, теорію теплообміну і економічну теорію». В останні роки, активно розвивається напрямок ексергоекологічного аналізу. Така гібридизація дисциплін дозволила вирішувати цілу низку практично важливих задач, що пов'язані з оцінюванням термодинамічної досконалості енергоперетворюючих систем та їх оптимізацією з урахуванням економічних і екологічних характеристик обладнання, проведення термоекономічної діагностики, яка вирішує задачу формування вартості цільового продукту (холоду, тепла, електроенергії) енергоперетворюючої установки з урахуванням її досконалості, та, як наслідок цього, розв'язує задачу формування тарифів на вироблену енергію.

Тому тема дисертації В.А. Волощука «Математичне моделювання об'єктів теплоенергетики на основі термодинамічних підходів» є, безумовно, актуальною.

Актуальність напрямку досліджень можна підтвердити тим, що він співпадає з напрямком «Енергетичної стратегії України на період до 2030 р.», схваленим розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 1071, відповідає положенням проекту оновленої Енергетичної стратегії України до 2035 року, директив та угод ЄС 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.

Актуальність досліджень підтверджується також участю здобувача у виконанні робіт у рамках держбюджетних тем Міністерства освіти і науки України: 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).

Метою дисертаційної роботи є створення та реалізація методологічної основи математичного моделювання теплоенергетичних систем на основі сумісного застосування Першого та Другого законів термодинаміки.

При виконанні досліджень автор використовував методи математичного моделювання режимів роботи та процесів на теплоенергетичних об'єктах та системах; методи сучасної прикладної термодинаміки, що базуються на поєднанні традиційного та поглибленого ексергетичного аналізу з оцінкою економічної вартості продукту та оцінкою життєвого циклу; методи теорії ймовірностей та математичної статистики для теоретичного обґрунтування й оцінювання критеріїв, що характеризують мінливість режимів роботи й параметрів прийняття рішень при створенні об'єктів та систем теплоенергетики у змінних погодно-кліматичних умовах.

## ***2. Наукова новизна досліджень і результатів дисертаційної роботи***

Оцінюючи найважливіші здобутки дисертаційного дослідження, варто вказати на результати, що мають вагому наукову новизну. Це, насамперед, розв'язання на основі теорії ймовірностей задач урахування мінливості погодно-кліматичного фактора: при розрахунку потреб ексергії для теплозабезпечення будинку; при розрахунку параметрів природньої вентиляції будинку; при виборі оптимального значення приведенного опору теплопередачі огорожувальної конструкції та розрахунку невизначеності цього рішення у випадку диференціації цін на енергоносії в залежності від кількості спожитої енергії. Вперше із застосуванням методів теорії ймовірностей теоретично доведена та на основі статистичного аналізу підтверджена доцільність застосування динамічних підходів для урахування мінливого та випадкового характеру впливу погодно-кліматичних факторів на технологічний процес з подальшим визначенням сезонних показників та критеріїв у методах поєднання ексергетичного, економічного та екологічного аналізу систем теплозабезпечення будинків. Вперше реалізовано у комплексі ексергетичний, ексергоекономічний і ексергоприродничий аналіз системи теплозабезпечення будинку на базі теплонасосної установки із визначення її оптимальних параметрів, що забезпечують одночасне покращення енергетичної (зростання коефіцієнта трансформації та ексергетичного ККД), економічної (зниження вартості продукту системи) та екологічної (зниження негативного впливу на довкілля при отриманні продукту системи) ефективності системи.

Безперечну наукову новизну має також 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.

Заслуговує на увагу й те, що вперше на основі математичного моделювання показано та доведено зростання мінливості режимів роботи системи теплозабезпечення при підвищенні енергоефективності будівель у змінних погодно-кліматичних умовах, що у свою чергу призводить до зростання невизначеності показників та критеріїв прийняття техніко-технологічних рішень у цих системах та необхідність влаштування більш гнучкої системи автоматичного регулювання.

**3. Практична значимість дисертаційної роботи** Волощука В.А. полягає у запропонованому та реалізованому способі з визначення теплофізичних властивостей робочих тіл на основі табличних даних методом інтерполяції, що дозволило створити як прямі, так і обернені функції для моделювання теплофізичних властивостей робочих тіл, а також теплоенергетичних процесів із застосуванням цих робочих тіл. Автором також розроблені та реалізовані відкриті інтерактивні алгоритми з моделювання об'єктів та систем теплоенергетики шляхом створення в мережі Інтернет за допомогою комп'ютерних програм Mathcad та Maple відповідної бази даних, що у свою чергу дало можливість збору, зберігання, інтелектуальної обробки даних з використанням сучасних математичних методів розрахунків і оптимізації. Запропоновано алгоритми термодинамічної оптимізації газотурбінних та парогазових теплоенергетичних установок з обґрунтуванням їх структури та параметрів. Показано та на основі діючих установок підтверджено, що розроблені та реалізовані алгоритми термодинамічної оптимізації газотурбінних та парогазових теплоенергетичних установок забезпечують підвищення внутрішнього ККД автономної безрегенеративної газотурбінної установки до 42...44 %, парогазової установки з котлом-утилізатором до 50...60 %.

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».

#### **4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій**

Для розв'язання задач дослідження автором створено комплекс математичних моделей, нових залежностей та засобів для аналізу

ексергоекономічних та ексергоекологічних показників енергоперетворюючих систем.

Обґрунтованість наукових положень можна довести тим, що при проведенні досліджень застосовуються перевірені та апробовані методи розрахунку теплотехнічних характеристик теплонасосних установок та огороджувальних конструкцій будівель.

Достовірність результатів, що подані у дисертаційній роботі В.А. Волощука, базуються на коректному використанні фундаментальних положень термодинаміки, методів теорії ймовірностей та математичної статистики, та підтверджується результатами моделювання і тестування розроблених методів, методик і алгоритмів і їх порівнянням із існуючими даними відомих робіт інших авторів.

Висновки повністю відповідають отриманим результатам, які відображені у тексті дисертації.

### ***5. Повнота викладення результатів у опублікованих роботах***

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.

Ознайомлення з текстом автореферату дисертації дає підстави стверджувати, що за структурою та змістом він відповідає всім вимогам. У тексті автореферату відображено основні положення, зміст, результати і висновки здійсненого Волощуком В.А. дослідження. Зміст автореферату та основні положення дисертації – ідентичні.

### ***6. Аналіз змісту розділів дисертаційної роботи***

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 260 найменувань та 5 додатків. Обсяг роботи становить 371 сторінку, 120 рисунків, 19 таблиць. Структура дисертації є чіткою. Її логіку підпорядковано вирішенню сформульованих дослідницьких завдань. Не викликають зауважень постановка мети, завдань, об'єкта та предмета дослідження. Наприкінці кожного розділу подано чіткі стислі висновки, які відповідають тексту дослідження.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, висвітлено зв'язок з науковими програмами, планами, темами, окреслено мету, визначено об'єкт, предмет, методологічну основу дослідження, розкрито наукову новизну, теоретичне та практичне значення роботи, показано апробацію її результатів та структуру дослідження (с. 29 – 40).

У **першому розділі** дисертаційної роботи проведено аналіз сучасного стану та шляхів подальшого розв'язання науково-технічної проблеми із удосконалення методології створення та реалізації математичних моделей з дослідження об'єктів та систем теплоенергетики, включаючи мінливість

режимів роботи таких систем через випадковий характер впливу погодно-кліматичного чинника, на основі термодинамічних підходів.

Наведено досить показові приклади необхідності застосування ексергетичних підходів до оцінювання енергоефективності теплотехнічних систем. Відзначаються можливі помилки, що виникають при проектуванні систем з використанням традиційних енергетичних підходів, або при застосуванні циклових методів термодинамічного аналізу. Зокрема відзначається обмеженість циклових методів при аналізі так званих відкритих теплотехнічних систем та можливу некоректність результатів аналізу при неправильному виборі зразкового циклу.

Відсутність зрозумілих для користувача програмних продуктів, що реалізують ексергетичний метод термодинамічного аналізу систем термотрансформації є основою причиною, за якою термодинамічні методи не набули поширення серед практиків. Основною проблемою, що ускладнює впровадження у практику проектування ексергетичних методів оцінювання, є необхідність постійного порівняння з еталонним циклом (по суті з абстракцією) для тестування кожного процесу в системі на відповідність Другому закону термодинаміки. Взагалі це є трудомісткою процедурою. Тому в роботі поставлена задача розроблення та реалізації нового методу організації процесів моделювання, який би забезпечив практичне впровадження розрахункових моделей на основі термодинамічних підходів, був легкодоступним, зручним та спирався на сучасні інформаційні технології й Інтернет.

По першому розділу зроблено висновки та сформульовано мету та завдання дослідження (с. 41 – 99).

*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. У розділі було поставлено задачу – оцінити вплив мінливості погодно-кліматичного 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. 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 запропонованого методу вирішено задачу 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. Під час створення та реалізації математичних моделей було використано квазістаціонарний підхід для добового проміжку часу.(с. 100 – 159).

*У третьому розділі* роботи автор розглядає найбільш затребуваний в даний час напрямок розвитку ексергетичного методу аналізу, який пов'язаний з вивченням специфіки взаємозв'язку ексергетичних втрат з урахуванням їх нееквівалентності в елементах схем термотрансформаторів. Обрано ексергоекономічний підхід, що популяризується учнями берлінської школи прикладної термодинаміки, очолюваної професором Дж. Тсатсаронісом. Незважаючи на широку представленість в зарубіжній літературі ексергоекономічних моделей різних енергоперетворюючих установок, на сьогодні вкрай обмеженими є відомості щодо реалізації цих моделей у вигляді як індивідуального програмного забезпечення, або у вигляді он-лайн програм діагностики ексергетичної ефективності. Особливістю розробленої автором ексергоекономічної моделі є можливість визначення взаємозв'язку між термодинамічними, економічними та екологічними показниками різних елементів термотрансформатора. Наприклад, як при зміні термодинамічної ефективності одного елемента термотрансформатора повинна змінюватися не тільки його капітальна вартість, але і вартість інших взаємопов'язаних з ним елементів. За цим критерієм розроблену автором ексергоекономічну модель можна віднести до ускладнених моделей за допомогою яких вирішуються різні оптимізаційні задачі при проектуванні термотрансформаторів. (с. 160 – 219).

*У четвертому розділі* удосконалено метод та розроблені й реалізовані математичні моделі термодинамічної оптимізації «зразкових циклів» деяких типів газотурбінних (ГТУ) та парогазових (ПГУ) теплоенергетичних установок.

У цьому розділі роботи автор дещо відходить від загальної ексергетичної концепції аналізу технічного систем, використовуючи традиційний термодинамічний підхід зразкових циклів. Дискусійним є використання автором терміну «зразковий цикл». Зазвичай в прикладній термодинаміці під зразковим циклом розуміють термодинамічну абстракцію уявлення циклу Карно, або циклу Лоренца. В такому зразковому циклі всі процеси повинні повністю повторювати напрямки протікання процесів робочої речовини реального циклу однак без генерації ентропії в процесі. Важливим інструментом тут є процедура вписання зразкового циклу у реальний цикл установки. Для цього обумовлюються строгі правила побудови самого зразкового циклу. З огляду на це, термінологічно правильно говорити не про зразковий цикл, а про порівняння з теоретичним ККД.

На основі розробленої математичної моделі, що ґрунтується на використанні масових та енергетичних балансових рівнянь для контрольних об'ємів, кожен з яких становив собою окремих елемент установки, автором проведено оптимізацію газотурбінних та парогазових теплоенергетичних установок з урахуванням зміни складу робочого тіла у компонентах. Визначено шляхи підвищення ефективності циклу за рахунок ускладнення циклу (завдяки використанню багатоконтурних котлів утилізаторів). Сформульовано практичні рекомендації щодо обґрунтування структури та

параметрів таких установок при підвищення їх енергетичного ККД (с. 220 – 258).

*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. Автором 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. Наведені приклади реалізації відкритих інтерактивних алгоритмів для чисельного дослідження термодинамічного циклу двохкаскадного теплового насоса та проведення ексергетичного аналізу системи теплозабезпечення будинку, а також для інтерактивної ексергоекономічної оптимізації методом наближень когенераційної газотурбінної установки. Розв'язання задач доповнюється веб-адресами Інтернет-сторінок, де можна виконати інтерактивний незалежний розрахунок, зробити посилання на «хмарну» функцію або завантажити відповідні файли. (с. 259 – 316).

Завершується робота досить розгорнутими висновками, які впливають зі змісту роботи, є логічними, і відображають основні результати дисертаційної роботи. (с. 317 – 321).

### ***7. Дискусійні положення та зауваження***

Разом із загальною високою оцінкою дисертації В.А. Волощука, слід звернути увагу на певні дискусійні моменти:

**1.** При огляді методів сучасної прикладної термодинаміки випущений з розгляду метод мінімізації зростання ентропії, а також метод термодинаміки при кінцевому часі. В цілому, у роботі слід було згрупувати за принципом використання авторами таких понять як ексергія або виробництво ентропії. Це б додало більшої інформативності наведеному матеріалу.

**2.** В огляді публікацій згадується, проте не конкретизується, чим відрізняється ексергетична вартість за методом А. Валеро від ексергетичної вартості за методом Дж. Тсатсароніса. Невизначеність цього терміну може призвести до некоректності постановки задачі термодинамічного та термoeкономічного аналізу.

**3.** Як відомо у термодинамічному аналізі за температуру навколишнього середовища може бути прийнята не тільки температура зовнішнього повітря, але і температура будь-якої іншого середовища, параметри якого не змінюються під впливом технічної системи. У контексті цього, робота, наприклад, опріснювальних суднових установок термотрансформації повинна аналізуватися при температурі морської води, а не при температурі атмосферного повітря. В роботі слід було відзначити,



яким чином можна адаптувати запропонований динамічний підхід при іншому навколишньому середовищі, ніж атмосферне повітря.

4. Термін термодинамічна оптимізація «зразкових циклів», який використовує автор, є не коректним. Зразкові цикли не потребують оптимізації, вони є термодинамічною абстракцією, та використовуються як еталон при співставленні з реальним циклом.

5. При розробленні ексергоекономічної моделі теплонасосної системи теплопостачання автор використовує спрощену математичну модель теплового насоса, що базується на експериментальних характеристиках процесів в елементах. У багатьох випадках ці характеристики представляють собою рівняння, що отримані шляхом апроксимації експериментальних залежностей щодо коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні та конденсації робочої речовини. Крім того, при розрахунку теплофізичних властивостей робочих речовин автор використовує не рівняння стану, а застосовує апроксимацію табличних даних. Похибка цих рівнянь в ряді випадків може досягати 15 %. У зв'язку з цим, в роботі слід було вказати, яким є діапазон неузгодженості між реальними та теоретичними характеристиками теплового насоса, що отримані із застосуванням спрощеної моделі.

6. При визначенні ендогенної та екзогенної складової втрат ексергії в елементах автор використовує процедуру побудови так званих гібридних циклів, коли зберігаються втрати в розглянутому елементі і усуваються втрати в інших елементах, потім проводиться перерахунок параметрів циклу і визначається частка складових втрат ексергії. Між тим, правила побудови гібридних циклів для установок з однокомпонентними холодоагентами (R22, R134a) і для установок, що використовують композиційні сумішеві холодоагенти (R404a, R407C) є різними. Це слід було відзначити у роботі, тому що застосування правил побудови гібридних циклів для однокомпонентних речовин до побудови циклів зі сумішевими холодоагентами не є некоректним та може призвести до значних похибок при розрахунках ексергетичних втрат. Теж саме стосується правил побудови циклів при визначенні усуненої і неминучої складових ексергетичних втрат у елементах.

7. При розрахунку навантаження на систему вентиляції температура внутрішнього повітря в приміщенні не може задаватися довільно, а повинна визначатися у залежності від температури зовнішнього повітря. Цей факт необхідно враховувати при розрахунку теплового навантаження для індивідуального кондиціонування приміщення, оскільки температура повітря в приміщенні значно впливає на параметри роботи випарника. Крім того, при оцінюванні впливу погодно-кліматичних умов, важливо врахувати вплив вологості повітря на ексергоекономічні показники теплонасосної системи тепло- і холодопостачання.

8. Ізоентропний ККД компресора є функцією ступеня стиснення у циклі, тому в розділах 3 та 4 роботи слід було дати пояснення, чому при ексергетичному аналізі теплонасосної установки він повинен задаватися у якості незалежного параметру.

**8. Висновки по відповідності дисертаційної роботи встановленим вимогам**

Розглянувши дисертацію Волощука Володимира Анатольовича можна зробити наступні висновки:

1. Стиль викладання чіткий, послідовний, виключає неоднозначність трактування і розуміння основних положень дисертаційного дослідження.

2. Оформлення дисертації відповідає вимогам подання науково-технічної інформації.

3. Основні результати опубліковані у періодичних виданнях, основні положення апробовані на науково-технічних конференціях.

4. Зміст автореферату відповідає змісту дисертації і дає повне уявлення про результати дослідження.

5. Дисертація В.А. Волощука є закінченим науковим дослідженням, більша частина зауважень має характер уточнень, які спрямовані на прояснення окремих нюансів дослідження, на подальший розвиток роботи, і не знижує значимість отриманих дисертантом результатів.

Дисертаційну роботу виконано на високому рівні, вона відповідає вимогам п. п. 9, 10 та 12–14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами), щодо докторських дисертацій, а її автор – Волощук Володимир Анатольович – заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник,  
провідний науковий співробітник  
відділу моделювання та  
ідентифікації теплових процесів  
Інституту проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного НАН України

Д. Х. Харлампіді

«14» травня 2018 р.

Підпис Харлампіді Д.Х. засвідчую:  
Учений секретар ІІМ НАН України  
доктор технічних наук



К. В. Максименко-Шейко