

## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

д.т.н., с.п.с. Горобця Валерія Григоровича

на дисертаційну роботу Ступака Олега Станіславовича

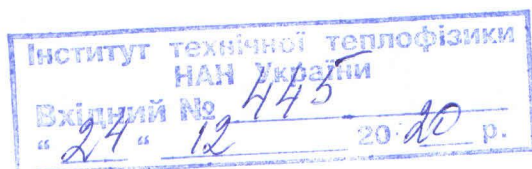
“Тепломасообмін в нових енергоефективних технологіях по циклу Майсоценка”, яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – Теплоенергетика.

### Актуальність теми дисертаційної роботи.

В сучасній енергетиці опалення та кондиціонування відіграють важливу роль в промисловій теплотехніці, як найбільш енергоємній галузі, на яку витрачається значна частка первинних енергоресурсів країни. Тому в даний час важливою проблемою являється пошук нових ідей та принципів, які дозволять суттєво підвищити ККД устаткування та знизити капітальні і експлуатаційні витрати. Одним із перспективних шляхів розвитку цього напрямку є застосування циклу Майсоценка (М-циклу), в основі якого лежить використання психрометричної енергії оточуючого середовища. М-цикл має високий потенціал для впровадження, як в системах кондиціонування та вентиляції, так і в різних енерго – і теплотехнологіях. Значний науковий і практичний інтерес представляє комбінація М-циклу з іншими термодинамічними циклами, яка дозволяє досягнути високої енергоефективності, екологічно безпечна та суттєво підвищити ККД теплоенергетичних установок. Саме розвитку цього актуального напрямку, пов'язаного із дослідженням комбінацій М-циклу з іншими термодинамічними циклами, а саме: циклом Ренкіна та субатмосферним циклом Брайтона, присвячена дисертаційна робота Ступака О.С.

### Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний об'єм роботи складає



189 сторінки, у тому числі всього 92 ілюстрації, 6 таблиць, список літератури, що включає 109 найменувань, 5 додатків на 17 сторінках. Об'єм основного тексту дисертації – 172 сторінок.

### **Оформлення дисертації, стиль викладу та мова дисертаційної роботи.**

Дисертаційна робота оформлена відповідно до стандарту ДСТУ 3008-95 «Документація. Звіти у сфері науки й техніки. Структура і правила оформлення». Матеріал дисертації викладено в послідовності, що відповідає поставленим в роботі завданням, текст дисертаційної роботи написано у науковому стилі. Обсяг і структура роботи відповідають вимогам, які встановлено АК МОН України.

Стиль висловлювання та подача матеріалу досліджень є логічними, послідовними і зв'язаними єдиною цільовою спрямованістю. Стиль викладу матеріалу дисертації, висновків, наукових положень є притаманним науковим дослідженням. Мова дисертації лаконічна, термінологічно відповідає сучасним нормам, коректна та зрозуміла.

Зміст дисертації, об'єкт і предмет дослідження відповідають паспорту спеціальності 144 – Теплоенергетика як за формулою спеціальності, так і за напрямками досліджень.

### **Основний зміст роботи.**

У вступі наведено обґрунтування вибору теми досліджень, показано зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету і завдання дослідження, обґрунтовано вибір методів досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, охарактеризовано особистий внесок автора, наведено відомості про апробацію результатів дисертації, вказано структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі викладено сучасний стан проблеми. Проведено літературний огляд локальних систем теплопостачання і кондиціонування та висвітлено тенденції розвитку цього сегменту теплоенергетики. Виконано систематизацію методів кондиціонування, в яких використовується випарне охолодження, проаналізовано їх основні недоліки. Для одноступеневих апаратів як прямого, так і непрямого типу основним недоліком є неможливість охолодження до температури, нижчої за температуру мокрого термометра. Наступний крок у розвитку непрямого випарного охолодження полягав у розробці В.С. Майсоценком циклу, який названо його ім'ям (скорочено М-цикл). В цьому циклі потік теплоносія може охолоджуватися до температури, яка нижча за температуру мокрого термометра. Теоретичною температурною границею при цьому є температура точки роси. Тепломасообмінні процеси апаратів, що працюють по М-циклу, є близькими до термодинамічно зворотних, що дозволяє отримати максимальний ефект охолодження повітря при мінімальних витратах енергії. На даний час цей напрямок розвивається як в Україні, так і в інших країнах. Значний внесок в дослідження та систематизацію даних по даній проблемі, окрім В.С. Майсоценка, зробили такі вчені, як А.Б. Циммерман, Х. Кхафаджи, В.І. Терехов, А.А. Халатов та інші. Показано, що М-цикл має високий потенціал впровадження у велику кількість технологічних процесів, як у системах кондиціонування, так і в нових енергетичних, тепло- і масообмінних технологіях.

Особливу увагу приділено описанню та аналізу існуючих апаратів, які працюють за циклом Майсоценка. Показано, що ефективність таких апаратів залежить від багатьох факторів, таких, як величина теплообмінної поверхні, рівномірність її зволоження, товщина водяної плівки та інші. Проаналізовано основні недоліки, зроблено висновки про шляхи удосконалення апаратів, працюючих по М-циклу.

За результатами аналізу літературних джерел сформульовані напрямок, мета та завдання експериментальних і теоретичних досліджень.

**У другому розділі** представлено результати аналізу комбінації М-циклу з іншими термодинамічними циклами.

Приведено в якості першого прикладу комбінації циклів – аналіз термодинамічного циклу Майсоценка-Ренкіна для повітряного опалення (дві схеми) та холодопостачання (одна схема).

За результатами експериментального дослідження отримано ККД апарату по М-циклу за температурою для схеми №1 від 58...72%, а для схеми №2 (з попереднім охолодженням вологого повітря) – від 79...92%. Коефіцієнт перетворення енергії COP для схеми №1 склав 6,3...7,21, а для схеми №2 – 7,44...9,73. Більш високі значення ККД та COP для схеми №2 пов'язані з конденсацією водяних парів у робочому каналі.

Коефіцієнт перетворення енергії при кондиціонуванні склав 10,49...16,32 при відносній вологості атмосферного повітря від 19,6 до 38,8%.

В якості другого прикладу комбінації циклів розглянуто субатмосферний зворотний цикл Брайтона з регенерацією теплоти по М-циклу та підігрівом повітря перед турбіною за рахунок сонячного нагрівача. Для розрахунку термодинамічних параметрів створено математична модель і алгоритм, які були реалізовані у вигляді комп'ютерної програми, що включає послідовний розрахунок параметрів циклу. Проаналізовано вплив різних факторів на ефективність термодинамічного циклу.

Обґрунтовано використання М-циклу, що дозволяє досягнути високого ступеню регенерації циклу, до 90% при температурі повітря після сонячного нагрівача 80°C. Схема субатмосферного циклу Брайтона дозволяє отримувати високі значення термічного ККД до 82% при відносно невисокій температурі вологого газу на вході в турбіну, на рівні 340°C, що обумовлено високою ентальпією потоку.

**У третьому розділі** розглянуто схему та принцип роботи нового теплообмінного апарату по М-циклу, представлено результати випробувань статичних та динамічних характеристики дев'яти зразків капілярно-пористих матеріалів. Дано опис експериментальної установки і робочої ділянки та

проведені дослідження тепло- і масообміну в елементарній комірці адіабатного каналу з вологими стінками по М-циклу.

Основною відмінністю запропонованої комірочки від існуючих прототипів є вертикальне розташування стінок щілинних каналів, з нанесеними на стінках вологих каналів капілярних покриттів. Вода за рахунок дії капілярних сил поступає знизу з піддону. Дані покриття дозволяють організувати транспорт води в зону випаровування рівно в тій кількості, яка необхідна при конкретних параметрах потоків, тобто така схема є самоузгодженою.

В результаті дослідження статичних характеристик зразків капілярно-пористих матеріалів із дев'яти зразків було вибрано два з найкращими характеристиками – «Coolpass» та абсорбуючий папір – вони в подальшому використовувались в тепломасообмінних експериментах.

Приведено результати експериментального дослідження динамічних характеристик капілярно-пористих матеріалів в адіабатному каналі з вологими стінками, які отримані на установці, що представляє собою газодинамічний контур відкритого типу. Всього було проведено 3 серії експериментів, в яких змінювались параметри повітря на вході, швидкість потоку повітря та схема подачі повітря вентилятором. За результатами досліджень отримано, що температура потоку досягає мінімуму на початковій ділянці каналу, а далі зростає незначним чином, що пов'язано з деякою недосконалістю теплоізоляції. Проте транспорт вологи по вертикальній координаті забезпечує насичення капілярного матеріалу по всій поверхні та процес зволоження відбувається самоузгоджено.

У четвертому розділі представлено результати експериментальних та розрахункових досліджень тепло- і масообміну в елементарній комірці по М-циклу, проаналізовано вплив різних факторів на термодинамічну ефективність комірочки.

Приведено результати експериментального дослідження ефективності охолодження повітря в діапазоні швидкості потоку в каналах від 0,5 м/с до 1.8 м/с (число Рейнольдса  $Re_d$ , яке визначається по еквівалентному діаметру

каналу ( $d_e \approx 2h$ , де  $h$  – висота каналу), змінювалось від 320 до 1200). Всього було проведено 13 серій експериментів.

Отримано експериментальним шляхом нові дані в діапазоні числа Рейнольдса 200...1200, температури повітря 16...30°C і його відносної вологості 30...50% та виявлено основні закономірності локального та середнього тепло- і масообміну в елементарній комірці тепломасообмінного апарату по М-циклу. Показано, що температура та відносна вологість повітря у сухому і робочому каналах комірки, однаково змінюються по довжині каналу. При  $Re_d < 500$  термодинамічна ефективність комірки по мокрому термометру перевищує одиницю, але знижується при збільшенні числа Рейнольдса.

Обґрунтовано вибір довжини каналу в елементарній комірці по М-циклу в діапазоні термодинамічної ефективності 86...94% та показано, що її підвищення на 1% збільшує довжину комірки на 7%, тобто збільшення ефективності понад 86% - не є доцільним. Показано доцільність інтенсифікації теплообміну в сухих каналах елементарної комірки, що підвищує термодинамічну ефективність апарату.

У додатках наведено елементи аналізу циклу Брайтона з регенерацією теплоти і сталими теплофізичними властивостями робочого тіла, залежності за якими аналізувалися основні параметри субатмосферного циклу Брайтона з регенерацією по М-циклу, експериментальні дані тепломасообміну в каналах при адіабатних умовах та в елементарній комірці, а також акти впровадження результатів наукової роботи.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.**

Положення та висновки дисертаційної роботи достатньо обґрунтовані теоретичними та експериментальними дослідженнями. Ця оцінка базується на коректній постановці мети та завдань дослідження, використанні

перевірених вихідних даних, застосуванні адекватних методів досліджень, логічному та чіткому формулюванні їх результатів, обговоренні висунутих наукових положень та зроблених висновків на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях, підтвердженні теоретичних висновків щодо запропонованих технічних рішень.

В роботі коректно використовуються положення теоретичних основ інформаційно-вимірювальної техніки, моделювання, розрахунки, та теорія похибок.

### **Наукова повизна отриманих результатів.**

В дисертації отримані наступні наукові результати:

- вперше розроблено схеми опалення та кондиціювання на основі комбінованого циклу Майсоценка та Ренкіна, проведено їх експериментальне дослідження в різноманітних кліматичних умовах, отримано рекордну термодинамічну ефективність з COP на рівні 6,3...9,73 для потреб повітряного опалення приміщень і COP на рівні 10,49...16,32 для потреб кондиціювання приміщень;
- вперше проведено аналіз субатмосферного циклу Брайтона з регенерацією теплоти по М-циклу та змінними теплофізичними властивостями робочого тіла і виконано його порівняння з ідеальним циклом Карно;
- вперше показано, що збільшення температури повітря на виході із сонячного нагрівача і температури пароповітряної суміші перед турбіною в субатмосферному циклу Брайтона, призводить до зростання ККД газотурбінної установки з 45% до 58% та отримано основні параметри циклу;
- вперше виконано експериментальне дослідження статичних характеристик 9 зразків капілярно-пористих матеріалів в адіабатних умовах і визначено висоту та швидкість підйому води в них при нульовій швидкості повітряного потоку;

– вперше виконано експериментальне дослідження динамічних (підйом води) і масообмінних характеристик в каналі малого еквівалентного діаметра з паралельними капілярно-пористими стінками в адіабатних умовах при ламінарному русі повітряного потоку зі швидкостями 0,15...2,4 м/с (числа Рейнольдса від 100 до 1600);

– вперше визначено вплив фактору інтенсифікації теплообміну в сухому і робочому каналах, довжини елементарної комірки по М-циклу і відносної вологості вхідного повітря на термодинамічну ефективність та показано, що в діапазоні зміни термодинамічної ефективності 86...94% підвищення ефективності на 1% призводить до збільшення довжини комірки на 7%;

– вперше на основі модифікованого  $\epsilon$ -NTU методу проведено розрахункове дослідження тепло- і масообміну в новій елементарній комірці, що працює по М-циклу, яке показало середню розбіжність  $\pm 6\%$ .

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень автора впроваджені на підприємстві АТ «БРОТЕП-ЕКО»: при розробці прототипу комбінованого повітряного теплового насоса по циклу Майсоценка-Ренкіна потужністю 28 кВт та при розробці системи повітряного опалення з високоефективним рекуператором повітря на основі циклу Майсоценка (акти впровадження від 21.12.2016 р. та від 22.12.2017 р. по договору №303 від 17.04.2008 р.); при створенні системи опалення складських приміщень та кондиціонування офісного приміщення (акт впровадження від 05.12.2018р. по договору №310 від 05.03.2018р.); при розробці методики розрахунку тепло- та масообміну в каналах з новими гідрофільними матеріалами випарного тепломасообмінного апарату для виготовлення тепломасообмінного апарату непрямого випарного типу (акт впровадження від 09.12.2019р. по договору №1/1/01 від 11.02.2019р.)



## **Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях.**

Основні положення та наукові результати викладено у 12 публікаціях наукових робіт, у тому числі: 5 статей у наукових спеціалізованих виданнях України, перелік яких затверджено МОН України; з опублікованих статей 1 стаття представлено у виданнях, які включено до міжнародних наукометричних баз даних Web of Science; опубліковано 2 тези доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень оприлюднено в 16 доповідях на наукових конференціях.

## **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

При загальній позитивній оцінці одержаних в роботі результатів і зроблених дисертантом висновків вважаю за необхідне зробити наступні зауваження.

1. В першому розділі розглянуто велику кількість різноманітних систем опалення, але відсутній аналіз традиційних систем вентиляції, тому числі з використанням систем охолодження з випаровуванням рідин і застосуванням рекуператорів.
2. Підвищення температури потоку в щілинному змочувальному каналі при  $x/d_e > 10-40$  в теплообміннику з М-циклом (рис. 3.12 стор. 105) свідчить про недостатню ефективність роботи теплообмінних поверхонь в цих областях та їх використання в конкретних конструкціях теплообмінників, які працюють за вказаним циклом.
3. З рис. 4.10 стор. 126 випливає, що термодинамічна ефективність комірки, що працює по М-циклу знижується при збільшенні числа Рейнольдса. Такий результат обмежує розробку ефективних теплообмінників з М-циклом великої потужності, оскільки у великій мірі величина потужності залежить від витрати теплоносіїв.

4. При експериментальних дослідженнях процесів тепло- і масопереносу в зволожувальних каналах (див. розділи 3, 4) не вдалося знайти залежність коефіцієнтів масообміну і теплообміну від числа Рейнольдса. Відсутність залежностей числа Нуссельта і числа Ейлера від числа Рейнольдса для теплообмінників, що працюють по М-циклу затрудняє проведення інженерних розрахунків при розробці теплообмінників вказаного типу.
5. З тексту дисертації незрозуміло який тип теплообмінників М-циклу являється більш ефективним – з перехресним напрямом руху теплоносіїв чи при протivotоці, що важливо при розробці нових конструкцій теплообмінних апаратів.
6. В роботі не розглянуто чи виникає замерзання водяної плівки у вологому каналі при контакті стінки з повітрям, температура якого нижче нуля.
7. В роботі не розглянуто і не описано заходи для очистки капілярно-пористого матеріалу на поверхні вологих каналів при роботі тепломасообмінного апарату Майсоценка.
8. В тексті дисертації наявні граматичні помилки і використовуються русизми: стор. 41 використовується «не пряме» потрібно «непряме»; стор. 71 використовується «крилата фраза» незрозуміло для чого вона використовується; стор. 120 використовується термін «січення» потрібно «переріз» та інші помилки.

#### **Загальний висновок та відповідність дисертації вимогам.**

В цілому, зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи і не зменшують цінність отриманих результатів.

Вважаю, що дисертаційна робота Ступака О.С. є завершеною науковою працею, присвяченою вирішенню важливої науково-технічної

задачі, яка полягає в теоретичному та експериментальному дослідженні тепло- та масообміну в каналах з непрямим випарним охолодженням і розробка нових енергоефективних технологій по М-циклу, включно з системами опалення та кондиціонування, новими конструкціями елементарної комірки тепломасообмінного апарату з капілярно-пористими стінками вологих каналів, а також регенеративним субатмосферним циклом Брайтона.

Робота є завершеним науковим дослідженням та відповідає вимогам п.п. 9-11 «Порядку проведення експерименту з присудженням ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 167 від 6 березня 2019 р. та Наказом МОН України № 40 від 12 січня 2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій», і її автор, Ступак Олег Станіславович, продемонструвавши достатній рівень наукової кваліфікації, заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 144 Теплоенергетика.

Офіційний опонент:

Доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник,  
завідувач кафедри теплоенергетики  
Національного університету біоресурсів  
і природокористування України



В.Г. Горобець

