

ВІДГУК

офіційного опонента на кваліфікаційну наукову працю

Ступак Олега Станіславовича

«Тепломасообмін в нових енергоефективних технологіях по циклу Майсоценка»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю

144 Теплоенергетика

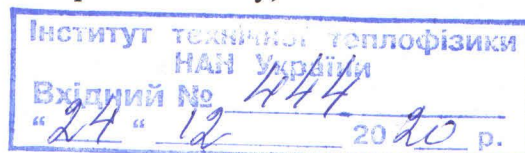
Актуальність теми. Енергозбереження – одна із основних проблем людства. Вирішення її переслідує дві основні цілі: збереження непоновлювальних енергоресурсів (ПЕР, викопних палив) і скорочення шкідливих викидів в атмосферу продуктів згорання, які, зокрема, є основними факторами зміни клімату. Вказана проблема прямо пов'язана з подальшим сталим розвитком суспільства.

Враховуючи постійне зростання вартості первинних енергоресурсів сьогодні вкрай необхідні нові енергоефективні технології. Однією з таких технологій є «цикл Майсоценка» (М-цикл). Принцип М-циклу полягає у використанні психрометричної енергії оточуючого середовища у вигляді різниці температур сухого та мокрого термометра.

Таким чином, актуальність дисертації Ступак О.С., яку присвячено експериментальному та теоретичному дослідженню процесів тепломасообміну в елементарних комірках апаратів по циклу Майсоценка, які є основою для розробки нового енергоефективного устаткування, а також дослідження застосування розглянутого тепломасообмінного обладнання М-циклу для опалення та кондиціонування приміщень та для інвертованого циклу Брайтона, не викликає сумнівів.

Наукова новизна роботи та важливість отриманих результатів. Основні наукові положення, висновки і рекомендації, отримані автором і представлені в дисертації, безпосередньо пов'язані з метою дослідження і полягають в наступному:

- вперше розроблено схеми опалення та кондиціонування на основі пароконденсійного циклу теплового насоса з використанням теплообмінних апаратів Майсоценка, проведено їх експериментальне дослідження для різних початкових умов;
- проведено аналіз інвертованого циклу Брайтона з регенерацією теплоти по М-циклу з парогазовим робочим тілом та із встановленим сонячним колектором;
- виконано експериментальне дослідження статичних характеристик 9 зразків капілярно-пористих матеріалів в адіабатних умовах і визначено висоту та швидкість підйому води в них при відсутності руху повітряного потоку;



– 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 отримано експериментальні дані в діапазоні числа Рейнольдса 200...1200, температури повітря 16...30°C і його відносній вологості 30...50% в елементарній комірці тепломасообмінного апарату по М-циклу. Показано, що температура та відносна вологість повітря у сухому та робочому каналах комірки однаково змінюються по довжині каналу. Вперше визначено вплив довжини елементарної комірки та відносної вологості повітря на її ефективність;

– вперше на основі модифікованого ε -NTU методу проведено розрахункове дослідження тепло- та масообміну в новій елементарній комірці, що працює по М-циклу. Співставлення з експериментальними даними показало середню розбіжність $\pm 6\%$.

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів підтверджується коректною постановкою завдань теоретичного та експериментального досліджень, підтвердженням адекватності математичної моделі з задовільним узгодженням розрахункових даних і даних отриманих під час експерименту, застосуванням сучасних методів експериментального дослідження, аналітичного та чисельного моделювання. В роботі коректно використовуються положення теоретичних основ інформаційно-виміральної техніки, моделювання, розрахунки, та теорія похибок.

Практичне значення одержаних результатів. Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень автора впроваджені на підприємстві АТ «БРОТЕП-ЕКО»: при розробці прототипу комбінованого повітряного теплового насоса потужністю 28 кВт та при розробці системи повітряного опалення з вискоефективним рекуператором повітря (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.)

Структура дисертації та зміст розділів. 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 сторінки.

У **вступі** наведено обґрунтування вибору теми дослідження, показано зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету і завдання дослідження, обґрунтовано вибір методів дослідження, 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 означено 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 термометру. Наступним кроком у розвитку непрямого випарного охолодження була розробка В.С. Майсоценком процесу, який названо його ім'ям (скорочено М-цикл). В цьому процесі потік може охолоджуватися до температури, яка є нижчою за температуру мокрого термометра. Теоретичною границею при цьому є температура точки роси. Тепломасообмінні процеси апаратів, що працюють по М-циклу, дозволяють отримати високий ефект охолодження повітря при мінімальних витратах енергії. 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 площа тепломасообмінної 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 напрямки, мета та завдання експериментальних та теоретичних досліджень.

У **другому розділі** представлено результати аналізу комбінації тепломасообмінних апаратів Майсоценка з різними термодинамічними циклами.

Приведено аналіз термодинамічного циклу парокомпресійного теплового насосу з апаратами Майсоценка для повітряного опалення та холодопостачання. Запропоновано дві

принципові схеми, за результатами експериментального дослідження показано можливість отримати коефіцієнт перетворення енергії (COP) більше 10 при відносній вологості атмосферного повітря від 20 до 40 %.

Розглянуто інвертований цикл Брайтона з регенерацією теплоти по М-циклу та підігрівом повітря перед турбіною за рахунок сонячного нагрівача. Для розрахунку термодинамічних параметрів створено математичну 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.

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, експериментальних досліджень тепло- та масообміну в адіабатному каналі з вологими стінками, дано опис експериментальної установки і робочої ділянки для дослідження тепло- та масообміну в елементарній комірці каналу по М-циклу.

Вибрано два матеріали з найкращими характеристиками – «Coolpass» та абсорбуючий папір – вони в подальшому використовувались в тепломасообмінних експериментах.

Основною відмінністю запропонованої комірки 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. Вибрані матеріали дозволяють організувати транспорт води в зону випаровування в необхідній кількості.

Приведено результати експериментального дослідження динамічних характеристик капілярно-пористих матеріалів в адіабатному каналі з вологими стінками, що представляє собою газодинамічний контур відкритого типу. Всього було проведено 3 серії експериментів, в яких змінювалися параметри повітря на вході, швидкість потоку повітря та схема подачі повітря вентилятором. За результатами дослідження вперше отримано особливості температурного поля в розробленому тепломасообмінному апараті.

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

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 змінювалося від 320 до 1200), температурі повітря 16...30°C і його відносній вологості 30...50%. Всього було проведено 13 серій експериментів.

Отримані експериментально нові дані та закономірності локального та середнього тепло- і масообміну в елементарній комірці тепломасообмінного апарату по М-циклу. Показано, що температура та відносна вологість повітря у сухому та 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 показано, що підвищення її ефективності на 1% збільшує довжину комірки на 7%. Зроблено висновок про недоцільність збільшення ефективності понад 86%. Показано перспективність інтенсифікації теплообміну в сухих каналах елементарної комірки.

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

Висвітлення результатів дисертації 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 представлена у виданні, яке включено до міжнародних наукометричних баз даних; опубліковано 2 тези доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

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

Оформлення кваліфікаційної роботи. Робота написана українською мовою на високому науково-професійному рівні, містить важливі наукові положення, які характеризуються новизною, а також практичні результати, що знайшли застосування в промисловості та в науково-дослідних організаціях. Рівень досліджень та глибина розгляду питань відповідає вимогам до кваліфікаційних наукових праць на здобуття наукового ступеня доктора філософії. Оформлення роботи відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України

Зауваження і питання по роботі.

До змісту кваліфікаційної роботи є наступні зауваження і питання:

1. У п. 2.1 розглянуто принципові схеми комбінованого циклу пароконденсійного теплового насосу з апаратами Майсоценка, але не вказано механізми регулювання параметрів повітря що надходить в приміщення.
2. В цьому ж розділі не розглянуті питання процесу конденсації вологи при від'ємних температурах, які мають місце при роботі системи.
3. У другому розділі Таблиці 2.1, 2.2 краще було винести в додатки, як це було зроблено для інших експериментальних даних в інших розділах; а отримані дані проілюструвати графічно, що полегшило б аналіз результатів.
4. В розділі 2.3 розглядається (див. рис.2.9 і далі) принципова «схема ГТУ на основі зворотного циклу Брайтона... і т.д.». Це нова термодинамічна схема, яка ще не отримала своєї офіційної назви в українській науковій літературі. В англійській мові найбільш поширена назва для цього циклу «Inverted Brayton Cycle», що краще перекласти як «Інвертований (або Перевернутий) цикл Брайтона», оскільки назва зворотній в нашій літературі застосовується для холодильних циклів.
5. В тому ж розділі відсутнє обґрунтування доцільності встановлення сонячного нагрівача повітря перед апаратом Майсоценка.
6. В експериментальній частині роботи (розділи 3 та 4) не розглянуто питання відкладання солей (чи необхідності спеціальної водопідготовки) в капілярно-пористому матеріалі та на поверхні вологих каналів при роботі тепломасообмінного апарату Майсоценка.
7. У роботі зустрічаються граматичні помилки.

Загальний висновок. Кваліфікаційна наукова робота Ступак О.С. є завершеною науковою працею, яка присвячена вирішенню важливої науково-технічної задачі, що полягає в теоретичному та експериментальному дослідженні тепло- та масообміну в каналах з непрямим випарним охолодженням і розробці нових енергоефективних технологій по М-циклу (для систем опалення та кондиціонування та регенеративного субатмосферного циклу Брайтона), і дослідженню нових конструкцій елементарної комірки тепломасообмінного апарату з капілярно-пористими стінками вологих каналів.

Робота повністю відповідає галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 144 Теплоенергетика. За сукупністю отриманих наукових результатів, їх актуальністю, новизною, обґрунтованістю, достовірністю та практичною цінністю кваліфікаційна наукова праця відповідає вимогам діючого «Порядку проведення експерименту з присудженням ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 167 від 6 березня 2019 р., а 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

доцент кафедри теоретичної і
промислової теплотехніки Національного
технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського» МОН України,
кандидат технічних наук, доцент

Соломаха А.С.

Підпис засвідчую

Вчений секретар КПІ ім. Ігоря Сікорського



Холявко В.В.