

АНОТАЦІЯ

Ступак О.С. Тепломасообмін в нових енергоефективних технологіях по циклу Майсоценка. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 14 електрична інженерія за 144 – Теплоенергетика. – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена теоретичному й експериментальному дослідженню тепло- та масообміну в каналах непрямого випарного охолодження, а також розробці 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.

Опалення та кондиціонування - найбільш енергоємні галузь енергетики, близько 55% загальних первинних енергоресурсів країни, тому проблема зростання вартості локального теплопостачання для населення України залишається гострою і являється однією з головних проблем енергетичної безпеки країни за рахунок постійного зростання вартості первинних енергоресурсів та великої кількості морально застарілих та енергозатратних систем опалення.

Серед відомих систем опалення та кондиціонування немає рішення, яке б кардинально допомогло у вирішенні цієї проблеми. Тому пошук нових схем і створення більш ефективних, екологічно чистих і дешевих установок локального тепло- та холодопостачання являється однією з головних проблем теплоенергетики України. Оскільки в Україні протягом останніх років спостерігається надлишок виробництва електричної енергії, тому найбільш перспективним напрямком представляється застосування нових досягнень технологій, термодинаміки і комбінація термодинамічних циклів.

В результаті аналізу літературних джерел, в яких наведено огляд існуючих систем опалення, результати експериментальних та теоретичних досліджень тепло- та масообміну випарного охолодження, зроблено висновок, що одним із перспективних напрямків розвитку термодинаміки являється цикл Майсоценка, який корисно використовує психрометричну енергію оточуючого середовища в формі різниці температур сухого і мокрого термометра. Цикл реалізується в тепломасообмінному апараті не прямого випарного типу охолодження з системою сухих і вологих каналів не великої висоти, в яких організовані процеси випаровування води та її конденсації. В результаті атмосферне повітря в апараті М-циклу розділяється на охоложене повітря та насичене(до 100%) повітря з початковою температурою, але більш високою ентальпією за рахунок використання психометричної енергії. Так як ступінь термодинамічної досконалості термодинамічних процесів, що протікають в апараті не прямого випарного охолодження, близька до одиниці теоретичною межею охолодження повітря в циклі є температура точки роси. Такого результату неможливо досягнути за допомогою інших термодинамічних циклів.

Цикл Майсоценка має високий потенціал впровадження у велику кількість технологічних процесів, насамперед в системах кондиціонування та вентиляції, але психрометричну енергію повітря, доцільно використати як рушійну силу в багатьох енергетичних і тепломасообмінних технологіях. Оскільки в пристроях на основі циклу Майсоценка використовується потенційна енергія навколишнього середовища (вологого повітря атмосфери), то вартість виробленої енергії істотно менша порівняно з іншими технологіями відновлюваної енергетики. Тому високий інтерес представляє дослідження та розробка нових енергоефективних технологій по циклу Майсоценка, серед яких кліматичні системи для потреб опалювання та кондиціонування приміщень, а також субатмосферний зворотній цикл Брайтона газотурбінної установки з регенерацією викидної теплоти по циклу Майсоценка.

Враховуючи складність задач дослідження комбінацій технологій з циклом Майсоценка, в дисертації застосовано комплексний підхід до дослідження, в

якому використовуються поєднання експериментального та теоретичного методів досліджень.

Дослідження ймовірності використання циклу Майсоценка для потреб опалення теоретично підтверджувалося здатністю підвищувати питому ентальпії потоку повітря яке нагрівається за рахунок психрометричної енергії оточуючого середовища, тому було розроблено схеми систем опалення на основі комбінованого циклу Майсоценка та Ренкіна. Експериментальне дослідження було проведено в різноманітних кліматичних умовах на установці, яка представляє собою систему повітряного опалення на базі теплового насосу та тепломасообмінного апарату Майсоценка. Процес нагріву чистого повітря з оточуючого середовища, без байпасування, проходить при послідовному підвищенню температури і вологості в апараті Майсоценка та додатковому догріванні конденсатором теплового насоса. В результаті аналізу та обробки експериментальних даних 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 кондиціонування приміщень.

Проведений аналіз субатмосферного циклу Брайтона зі змінними теплофізичними властивостями робочого тіла з регенерацією теплоти по М-циклу та сонячним нагрівачем показав зростання термічного ККД регенеративного циклу з ростом масового вмісту води робочого тіла на вході в турбіну. Високі значення термічного ККД циклу ($\eta_t = 80...87\%$) можна досягти при порівняно невисоких значеннях ступеня підвищення тиску в циклі ($\pi < 5$) та високих значеннях масового вмісту води робочого тіла на вході в турбіну. Збільшення температури повітря на виході із сонячного нагрівача і температури пароповітряної суміші перед турбіною, призводить до зростання ККД газотурбінної установки з 45% до 58%. Висока міра регенерації теплоти у циклі – понад 90%, яка досягається при температурі повітря за сонячним нагрівачем 80°C, сприяє збільшенню термічного ККД η_{tr} від 65% до 74%, розглядаючи зміну температури робочого тіла перед турбіною від 200°C до 340°C. Але зі збільшенням відносної вологості атмосферного повітря, значення ККД

зменшується. Для температури повітря за сонячним нагрівачем 80°C при збільшенні відносної вологості від 20% до 100% ККД зменшується від 74% до 69%. Це зменшення обумовлено зменшенням ступеня регенерації теплової енергії в апараті Майсоценка.

Як показав аналіз, конструкції існуючих тепломасообмінних апаратів по циклу Майсоценка має ряд недоліків, що ускладнює його використання, а саме: високу витрату води на виробництво одиниці холоду, ускладнене регулювання параметрів вихідного повітря, відносно низькі межі робочих параметрів експлуатації. В зв'язку з цим створення більш досконалої конструкції *тепломасообмінного апарата на основі циклу Майсоценка* являється основним напрямком при розробці нових енергоефективних технологій опалення та кондиціонування. Тому для розробка та створення нової конструкції тепломасообмінного апарату М-циклу вертикального типу з капілярно-пористими стінками вологих каналів було виконано пошук та проведено 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, серед яких обрано 2 найкращі зразки та 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. В результаті аналізу та обробки експериментальних даних щодо масообміну в такому каналі створено експериментальну установку для дослідження тепломасообміну в елементарній комірці каналу по М-циклу за новою схемою з сухими і вологими паралельними каналами малого еквівалентного діаметру та проведено експериментальне дослідження в широкому діапазоні числа Рейнольдса 200...1200, в температурному проміжку $16...30^{\circ}\text{C}$, при відносній вологості повітря 30...50% та проведено розрахункове (з використанням модифікованого ε -NTU методу) дослідження тепло- та масообміну в новій елементарній комірці, що працює по М-циклу.

В результаті аналізу та обробки експериментальних даних щодо ефективності комірки по М-циклу було отримано, що термодинамічна ефективність комірки по М-циклу знижується із зростанням швидкості потоку. Причому, при $Re_d < 500$ ефективність по температурі точки роси була понад 0.8, а по мокрому термометру перевищувала одиницю, тобто температура вологого потоку знижується до величини, меншої за температуру мокрого термометра.

Для підтвердження експериментальних даних проведено розрахункове (з використанням модифікованого ϵ -NTU методу) дослідження тепло- та масообміну в новій елементарній комірці, що працює по М-циклу, яке показало, що середня розбіжність складає $\pm 6\%$.

В заключній частині дисертації виконані розрахунки впливу різних факторів на термодинамічну ефективність комірки по М-циклу, а саме: геометрія (висота та довжина каналів), якість матеріалів (капілярні властивості, теплопровідність), початкові умови (температура та вологість повітря на вході в комірку), режимні фактори (швидкість потоку, число Рейнольдса в каналі, інтенсифікація теплообміну в сухому та робочому каналах).

Ключові слова: *теплопостачання, опалення і кондиціонування, цикл Майсоценка, цикл Ренкіна, тепловий насос, рекуперація теплоти, цикл Брайтона, тепломасообмінний апарат.*

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Ступак О.С., Халатов А.А., Галака О.І., Грищук М.С. Новий комбінований термодинамічний цикл // Доповіді Національної академії наук України.— 2018. —№ 2. — С. 58–64. doi.org/10.15407/dopovidi2018.02.058 (*Внесок здобувача: розробка та створення експериментального стенду, проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних*).
2. Халатов А.А., Северин С.Д., Ступак О.С., Шихабутінова О.В. Эффективность регенеративного цикла Брайтона с переменными теплофизическими свойствами рабочего тела. Часть 1 // Теплофізика та теплоенергетика. — 2019. —Т.41, № 2. — С. 5–10. doi.org/10.31472/tpre.2.2019.1 (*Внесок здобувача: літературний пошук, аналіз та систематизація літературних даних*).
3. Халатов А.А., Северин С.Д., Ступак О.С., Шихабутінова О.В. Эффективность регенеративного цикла Брайтона с переменными теплофизическими свойствами рабочего тела. Часть 2 // Теплофізика та теплоенергетика.— 2019. —Т.41, № 3. — С. 5–13. doi.org/10.31472/tpre.3.2019.1 (*Внесок здобувача: літературний пошук, аналіз та систематизація літературних даних, участь у розробці методики та проведення розрахунків*).
4. Халатов А.А., Доник Т.В., Ступак О.С. Аналіз термодинамічного зворотного циклу Брайтона з утилізацією викидної теплоти по М-циклу // Вчені Записки Таврійського Університету ім. В.І. Вернадського, сер. «Технічні науки»,— 2020. — Т.31(70), №1, ч. 2, — С. 55-61. (*Внесок здобувача: проведення огляду та аналізу літературних джерел, участь у розробці методики та проведення розрахунків*).
5. O. Stupak, A. Khalatov, T. Donyk, O. Shikhabutinova A study of new local heating and air conditioning schemes based on the Maisotsenko cycle//Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.— 2019. – Vol 3, № 8. – С. 6–

14. doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205047 **SCOPUS** (*Внесок здобувача: проведення огляду та аналізу літературних джерел, розробка та створення експериментального стенду, проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних*).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. О. С. Ступак, А. А. Халатов, М. С. Грищук, О. І. Галака Суперефективний тепловий насос з використанням енергії навколишнього середовища // Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики». Секція «Фізика енергетичних систем», м. Київ, 26-28 травня 2016. – Київ : НТУУ «КПІ». – 2016. – С. 126-129. el.kpi.ua/handle/123456789/16628 (*Внесок здобувача: розробка та створення експериментального стенду, проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних*).
7. Ступак О.С., Халатов А.А. Шіхабутінова О.В. Результати експериментального дослідження суперефективного теплового насоса для потреб опалення приміщень // Теплофізика та теплоенергетика.— 2019. – Т.41, № 5. – С. 53.(*Внесок здобувача: розробка та створення експериментального стенду, проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних*).

Наукові праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:

8. Халатов А.А., Ступак О.С., Грищук М.С., Галака О.І. Система повітряного опалення. Патент України № 111096. 25.10.2016, Дата подання 09.06.2016. (*Внесок здобувача: розробка та створення експериментального стенду, проведення експериментальних досліджень, обробка, аналіз експериментальних даних та патентний пошук*).
9. Халатов А.А., Ступак О.С., Грищук М.С., Галака О.І. Система повітряного опалення. Патент України № 119186. 10.05.2019, Дата

подання 23.06.2017. *(Внесок здобувача: розробка та створення експериментального стенду, проведення експериментальних досліджень, обробка, аналіз експериментальних даних та патентний пошук).*

10.Халатов А.А., Ступак О.С., Грищук М.С., Галака О.І., Згуровський М.З., Ільченко М.Е., Проценко В.О., Петренко М.М. Система повітряного опалення. Патент України № 128732. 10.10.2018, Дата подання 07.03.2018. *(Внесок здобувача: розробка та створення експериментального стенду, проведення експериментальних досліджень, обробка, аналіз експериментальних даних та патентний пошук).*

11.Халатов А.А., Ступак О.С., Грищук М.С., Галака О.І. Система повітряного опалення. Патент України № 129896. 26.11.2018, Дата подання 22.09.2016. *(Внесок здобувача: розробка та створення експериментального стенду, проведення експериментальних досліджень, обробка, аналіз експериментальних даних та патентний пошук).*

12.Халатов А.А., Ступак О.С., Грищук М.С., Галака О.І., Згуровський М.З., Ільченко М.Е., Проценко В.О., Петренко М.М. Система повітряного опалення. Патент України № 121248. 27.04.2020, Дата подання 07.03.2018. *(Внесок здобувача: розробка та створення експериментального стенду, проведення експериментальних досліджень, обробка, аналіз експериментальних даних та патентний пошук).*

Апробація результатів дисертації:

Основні положення роботи викладено та обговорено на конференціях різного рівня:

1. Ступак О.С., Халатов А.А., Галака О.І., Грищук М.С. Енергоефективний тепловий насос на основі циклу Майсоценка. Форум «Енергоефективні технології та проекти», м. Київ, 21 квітня 2016 р.

2. О. С. Ступак, А. А. Халатов, М. С. Гришук, О. І. Галака Суперфективний тепловий насос з використанням енергії навколишнього середовища. XIV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики». Секція «Фізика енергетичних систем», м. Київ, 26-28 травня 2016 р.
3. Ступак О.С., Халатов А.А., Галака О.І., Гришук М.С. Суперфективний тепловий насос. Sikorsky challenge 2016, м. Київ, 11-13 жовтня 2016 р.
4. Ступак О.С., Халатов А.А. Суперфективний тепловий насос на основі циклів Майсоценко та Ренкіна. IV Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК», м. Київ, 21-22 листопада 2016р.
5. Ступак О.С., Халатов А.А. Наука — народу України: Суперфективний тепловий насос нового покоління. Міжнародний форум INNOVATION MARKET, м. Київ, 22-24 листопада 2016 р.
6. Ступак О.С., Халатов А.А. Суперфективний тепловий насос нового покоління IV Міжнародна науково-технічна конференція «Теплові насоси в будівлях та містах України». м. Київ, 24 листопада 2016 р.
7. Ступак О.С., Халатов А.А. Суперфективний тепловий насос нового покоління. Виставка інноваційних проектів та стартапів науковців і студентів КПІ імені Ігоря Сікорського з проблем енергозабезпечення, енергоефективності та енергозбереження, м. Київ, 15 березня 2018 р.
8. Ступак О.С. Халатов А.А. Суперфективний тепловий насос. Семінар кафедри ТПТ ТЕФ КПІ імені Ігоря Сікорського, м. Київ, 5 квітня 2018 р.
9. Ступак О.С. Халатов А.А. Super Effective Heat Pump. Виставка інноваційних проектів науковців і студентів КПІ імені Ігоря Сікорського для співпраці з інвестиційним фондом “Zhejiang Golden Egg Science and Technology”, м. Київ, 16 квітня 2018 р.
10. Ступак О.С. Халатов А.А. Super Effective Heat Pump. Презентація-захист проектів на фінансування від ЄБРР в рамках III етапу Програми Кліматичних Ваучерів, м. Київ, 03 травня 2018 р.

11. Ступак О.С., Халатов А.А., Шіхабутінова О.В. Результати експериментального дослідження суперрефективного теплового насоса для потреб опалення приміщень. XI Міжнародна конференція «Проблеми теплофізики та теплоенергетики», м. Київ, 21-22 травня 2019 р.
12. Ступак О.С. Super efficient heat pump. 2019 Hangzhou International Human Resources Exchanges and Cooperation Conference, м. Ханджоу, Китай, 9-24 листопада 2019 року.
13. Ступак О.С. Super efficient heat pump. 2019 Future Forum, м. Ханджоу, Китай, 10 листопада 2019 року.
14. Ступак О.С. Super efficient heat pump. Project Expert Review Meeting at China-Ukraine Aerospace Technology Research Institute, м. Ханджоу, Китай, 12 листопада 2019 року.
15. Ступак О.С. Super efficient heat pump. "Creating the World·Sailing to the Future" Innovation and Entrepreneurship Competition for Overseas Talent 2020 Hangzhou, м. Ханджоу, Китай, 29 вересня 2020 року.
16. Ступак О.С., Халатов А.А., Гришук М.С. Суперрефективний тепловий насос. Sikorsky challenge 2020, м. Київ, 3-13 листопада 2020 року.

За результатами виступів отримано нагороди:

1. Диплом за найкращий виступ на XIV Всеукраїнській науково-практичній конференції «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики» за темою: «Суперрефективний тепловий насос з використанням енергії навколишнього середовища», м. Київ, 26-28 травня 2016 р.
2. Диплом фіналіста на інноваційному конкурсі Sikorsky challenge 2016 з проектом «Суперрефективний тепловий насос», м. Київ, 11-13 жовтня 2016 р.
3. Почесна грамота за кращу доповідь, представлену на XI Міжнародній конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики», м. Київ, 21-22 травня 2019 р.

4. Honor certificate за доповідь, представлену на Project Expert Review Meeting at China-Ukraine Aerospace Technology Research Institute, м. Ханджоу, Китай, 12 листопада 2019 року.

ANNOTATION

Stupak O.S. Heat and mass transfer in new energy efficient technologies according to the Maisotsenko cycle. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy in the field of knowledge 14 electric engineering for 144 - Heat power. - Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to theoretical and experimental research of heat and mass transfer in channels of indirect evaporative cooling, and also to development of new energy efficient technologies on M-cycle, including heating and conditioning systems, new designs of an elementary cell of the heat and mass exchange device with capillaries and porous also the regenerative subatmospheric cycle of Brighton.

Heating and air conditioning are the most energy-intensive energy sectors, about 55% of the country's total primary energy resources, so the problem of increasing the cost of local heating for the population of Ukraine remains acute and is one of the main problems of energy security. energy-intensive heating systems.

Among the known heating and air conditioning systems, there is no solution that would dramatically help solve this problem. Therefore, the search for new schemes and the creation of more efficient, environmentally friendly and cheap local heat and cooling systems is one of the main problems of the heat industry of Ukraine. As in Ukraine in recent years there has been a surplus of electricity production, so the most promising area is the application of new advances in technology, thermodynamics and a combination of thermodynamic cycles.

As a result of the analysis of literature sources, which provide an overview of existing heating systems, experimental and theoretical studies of heat and mass transfer of evaporative cooling, it is concluded that one of the promising areas of

thermodynamics is the Maisotsenko cycle, which makes good use of ambient psychrometric energy. dry and wet bulb temperatures. The cycle is implemented in a heat and mass transfer apparatus of non-direct evaporative type of cooling with a system of dry and wet channels of low height, in which the processes of water evaporation and condensation are organized. As a result, the atmospheric air in the M-cycle apparatus is divided into cooled air and saturated (up to 100%) air with an initial temperature, but a higher enthalpy due to the use of psychrometric energy. Since the degree of thermodynamic perfection of thermodynamic processes occurring in the apparatus of indirect evaporative cooling, close to unity, the theoretical limit of air cooling in the cycle is the dew point temperature. This result cannot be achieved with other thermodynamic cycles.

The Maisotsenko cycle has a high potential for implementation in a large number of technological processes, primarily in air conditioning and ventilation systems, but psychrometric air energy should be used as a driving force in many energy and heat and mass transfer technologies. Because the Maisotsenko cycle-based devices use the potential energy of the environment (humid air of the atmosphere), the cost of energy produced is significantly lower compared to other renewable energy technologies. Therefore, of great interest is the research and development of new energy-efficient technologies in the Maisotsenko cycle, including air conditioning systems for heating and air conditioning, as well as the subatmospheric reverse cycle of the Brighton gas turbine with heat recovery in the Maisotsenko cycle.

Given the complexity of the problems of research of combinations of technologies with the Maisotsenko cycle, the dissertation uses a comprehensive approach to research, which uses a combination of experimental and theoretical research methods.

The study of the probability of using the Maisotsenko cycle for heating purposes was theoretically confirmed by the ability to increase the specific enthalpy of the air flow heated by psychrometric energy of the environment, so schemes of heating systems based on the combined Maisotsenko and Rankin cycle were developed. The

experimental study was carried out in different climatic conditions at the installation, which is an air heating system based on a heat pump and heat and mass transfer apparatus Maisotsenko. The process of heating clean air from the environment, without bypassing, takes place with a consistent increase in temperature and humidity in the device Maisotsenko and additional heating by the condenser of the heat pump. As a result of analysis and processing of experimental data, a record thermodynamic efficiency was obtained with COP at the level of 6.3... 9.73 for the needs of air heating of premises and COP at the level of 10.49... 16.32 for the needs of indoor air conditioning.

The analysis of the Brighton subatmospheric cycle with variable thermophysical properties of the working fluid with M-cycle heat regeneration and solar heater showed an increase in thermal efficiency of the regenerative cycle with increasing mass content of working fluid at the turbine inlet. High values of the thermal efficiency of the cycle ($\eta_t = 80...87\%$) can be achieved at relatively low values of the degree of pressure increase in the cycle ($\pi < 5$) and high values of the mass moisture content of the working fluid at the inlet to the turbine. Increasing the air temperature at the outlet of the solar heater and the temperature of the steam-air mixture in front of the turbine leads to an increase in the efficiency of the gas turbine unit from 45% to 58%. A high degree of heat recovery in the cycle - more than 90%, which is achieved at an air temperature behind a solar heater of 80 ° C, increases the thermal efficiency η_{tp} from 65% to 74%, considering the change in working temperature in front of the turbine from 200 ° C to 340 ° C . But with increasing relative humidity, the efficiency decreases. For air temperature behind a solar heater of 80 ° C at increase in relative humidity from 20% to 100% efficiency decreases from 74% to 69%. This decrease is due to a decrease in the degree of regeneration of thermal energy in the apparatus of Maisotsenko.

As the analysis showed, the design of existing heat and mass exchangers on the Maysotsenko cycle has a number of disadvantages that complicate its use, namely: high water consumption for the production of a unit of cold, difficult regulation of exhaust air parameters, relatively low operating parameters. In this regard, the

creation of a more advanced design of the heat and mass transfer device based on the Maisotsenko cycle is the main direction in the development of new energy-efficient heating and air conditioning technologies. Therefore, to develop and create a new design of heat exchanger M-cycle vertical type with capillary-porous walls of wet channels, a search was performed and an experimental study of the static characteristics of 9 samples of capillary-porous materials in adiabatic conditions and determined the height and rate of water rise at zero air flow velocities, among which the 2 best samples were selected and an experimental study of dynamic (water rise) and mass transfer characteristics in a channel of small equivalent diameter with parallel capillary-porous walls in adiabatic conditions with laminar air flow with velocities of 0.15... 2.4 m / s. As a result of analysis and processing of experimental data on mass transfer in such a channel, an experimental installation for heat and mass transfer in the unit cell of the M-cycle channel according to a new scheme with dry and wet parallel channels of small equivalent diameter was created and an experimental study in a wide range, in the temperature range of 16... 30 ° C, at a relative humidity of 30... 50% and a calculated (using a modified ε -NTU method) study of heat and mass transfer in a new unit cell operating on the M-cycle.

As a result of analysis and processing of experimental data on the efficiency of the M-cycle cell, it was obtained that the thermodynamic efficiency of the M-cycle cell decreases with increasing flow rate. Moreover, at $Re_d < 500$, the efficiency of the dew point temperature was more than 0.8, and the wet bulb thermometer exceeded one, ie the temperature of the wet stream decreases to a value less than the temperature of the wet bulb thermometer.

To confirm the experimental data, a calculated (using a modified ε -NTU method) study of heat and mass transfer in a new unit cell operating on the M-cycle was performed, which showed that the average discrepancy is $\pm 6\%$.

In the final part of the dissertation calculations of influence of various factors on thermodynamic efficiency of a cell on M-cycle, namely: geometry (height and length of channels), quality of materials (capillary properties, thermal conductivity), initial conditions (temperature and humidity of an air in an entrance to a cell) are executed. ,

mode factors (flow rate, Reynolds number in the channel, intensification of heat transfer in the dry and working channels).

Key words: *heat supply, heating and conditioning, Maisotsenko cycle, Rankin cycle, heat pump, heat recovery, Brighton cycle, heat and mass transfer apparatus.*

LIST OF PUBLICATIONS

Scientific papers, in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Stupak O.S., Khalatov A.A., Galaka O.I., Gryshuk M.S. Novyj kombinovanyj termodynamichnyj cy`kl // Dopovidi Nacional`noyi akademiyi nauk Ukrainy.— 2018. —№ 2. — P. 58–64. doi.org/10.15407/dopovidi2018.02.058 (Applicant's contribution: development and creation of an experimental stand, conducting experimental research, processing and analysis of experimental data).
2. Khalatov A.A., Severyn S.D., Stupak O.S., Shyhabutinova O.V. Effektyvnost regeneratyvnogo cykla Brajtona s peremennymi teplofizicheskimi svojstvami rabochoho tela. Chastyna 1 // Teplofizyka ta teploenergetyka. — 2019. — Vol.41, № 2. — P. 5–10. doi.org/10.31472/tpe.2.2019.1 (Applicant's contribution: literary search, analysis and systematization of literary data).
3. Khalatov A.A., Severyn S.D., Stupak O.S., Shyhabutinova O.V. Effektyvnost regeneratyvnogo cykla Brajtona s peremennymi teplofizicheskimi svojstvami rabochoho tela. Chastyna 1 // Teplofizyka ta teploenergetyka. — 2019. — Vol.41, № 3. — P. 5–13. doi.org/10.31472/tpe.3.2019.1 (Applicant's contribution: literary search, analysis and systematization of literary data, participation in the development of methods and calculations).
4. Khalatov A.A., Donyk T.V., Stupak O.S. Analiz termodynamichnogo zvorotnogo cyklu Brajtona z utylizacieyu vykydnoyi teploty po M-cyklu // Vcheni Zapysky Tavrijskogo Universytetu im. V.I. Vernadskogo, ser. «Texnichni nauky»,— 2020. — Vol.31(70), №1, — P. 55-61. (Applicant's contribution: review and analysis of literature sources, participation in the development of methods and calculations).
5. O. Stupak, A. Khalatov, T. Donyk, O. Shikhabutinova A study of new local heating and air conditioning schemes based on the Maisotsenko cycle//Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.— 2019. — Vol 3, № 8. — C. 6–14. doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205047 (Applicant's contribution:

review and analysis of literature sources, development and creation of an experimental stand, conducting experimental research, processing and analysis of experimental data).

Scientific works that certify the approbation of the dissertation materials:

1. O. S. Stupak, A. A. Khalatov, M. S. Hryshuk, O. I. Halaka Superefektyvnyi teplovyi nasos z vykorystanniam enerhii navkolyshnoho seredovyshcha // Materialy XIV Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh «Teoretychni i prykladni problemy fizyky, matematyky ta informatyky». Sektsiia «Fizyka enerhetychnykh system», m. Kyiv, 26-28 travnia 2016. – Kyiv : NTUU «KPI». – 2016. – P. 126-129. ela.kpi.ua/handle/123456789/16628 (*Applicant's contribution: development and creation of an experimental stand, conducting experimental research, processing and analysis of experimental data*).
2. Stupak O.S., Khalatov A.A. Shikhabutinova O.V. Rezultaty eksperymentalnoho doslidzhennia superefektyvnoho teplovoho nasosa dlia potreb opalennia prymishchen // Teplofizyka ta teploenerhetyka.— 2019. – Vol.41, № 5. – P. 53. (*Applicant's contribution: development and creation of an experimental stand, conducting experimental research, processing and analysis of experimental data*).

Наукові праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:

1. Khalatov A.A., Stupak O.S., Hryshchuk M.S., Halaka O.I. Systema povitrianoho opalennia. Patent Ukrainy № 111096. 25.10.2016. (*Applicant's contribution: development and creation of an experimental stand, conducting experimental research, processing, analysis of experimental data and patent search*).
2. Khalatov A.A., Stupak O.S., Hryshchuk M.S., Halaka O.I. Systema povitrianoho opalennia. Patent Ukrainy № 119186. 10.05.2019. (*Applicant's contribution: development and creation of an experimental stand, conducting*

experimental research, processing, analysis of experimental data and patent search).

3. Khalatov A.A., Stupak O.S., Hryshchuk M.S., Halaka O.I., Zghurovskyi M.Z., Ilchenko M.E., Protsenko V.O., Petrenko M.M. Systema povitrianoho opalennia. Patent Ukrainy № 128732. 10.10.2018. (*Applicant's contribution: development and creation of an experimental stand, conducting experimental research, processing, analysis of experimental data and patent search*).
4. Khalatov A.A., Stupak O.S., Hryshchuk M.S., Halaka O.I. Systema povitrianoho opalennia. Patent Ukrainy № 129896. 26.11.2018. (*Applicant's contribution: development and creation of an experimental stand, conducting experimental research, processing, analysis of experimental data and patent search*).
5. Khalatov A.A., Stupak O.S., Hryshchuk M.S., Halaka O.I., Zghurovskyi M.Z., Ilchenko M.E., Protsenko V.O., Petrenko M.M. Systema povitrianoho opalennia. Patent Ukrainy № 121248. (*Applicant's contribution: development and creation of an experimental stand, conducting experimental research, processing, analysis of experimental data and patent search*).

Approbation of dissertation results:

The main provisions of the work are presented and discussed at conferences of various levels:

1. Stupak O.S., Khalatov A.A., Halaka O.I., Hryshchuk M.S. Enerhoefektyvnyi teplovyi nasos na osnovi tsykladu Maisotsenka. Forum «Enerhoefektyvni tekhnolohii ta proekty», Kyiv, April 21, 2016
2. O. S. Stupak, A. A. Khalatov, M. S. Hryshchuk, O. I. Halaka Superefektyvnyi teplovyi nasos z vykorystanniam enerhii navkolyshnoho seredovyscha. XIV Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh «Teoretychni i prykladni problemy fizyky, matematyky ta informatyky». Sektsiia «Fizyka enerhetychnykh system», Kyiv, May 26-28, 2016.

3. Stupak O.S., Khalatov A.A., Halaka O.I., Hryshuk M.S. Superefektyvnyi teplovyi nasos. Sikorsky challenge 2016, Kyiv, October 11-13, 2016.
4. Stupak O.S., Khalatov A.A. Superefektyvnyi teplovyi nasos na osnovi tsykliv Maisotsenko ta Renkina. IV Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Problemy ta perspektyvy rozvytku enerhetyky, elektrotekhnolohii ta avtomatyky v APK», Kyiv, November 21-22, 2016.
5. Stupak O.S., Khalatov A.A. Nauka — narodu Ukrainy: Superefektyvnyi teplovyi nasos novoho pokolinnia. Mizhnarodnyi forum INNOVATION MARKET, Kyiv, November 22-24, 2016.
6. Stupak O.S., Khalatov A.A. Superefektyvnyi teplovyi nasos novoho pokolinnia IV Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Teplovi nasosy v budivliakh ta mistakh Ukrainy». Kyiv, November 24, 2016.
7. Stupak O.S., Khalatov A.A. Superefektyvnyi teplovyi nasos novoho pokolinnia. Vystavka innovatsiinykh proektiv ta startapiv naukovtsiv i studentiv KPI imeni Ihoria Sikorskoho z problem enerhozabezpechennia, enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennia, Kyiv, March 15, 2018.
8. Stupak O.S. Khalatov A.A. Superefektyvnyi teplovyi nasos. Seminar kafedry TPT TEF KPI imeni Ihoria Sikorskoho, Kyiv, April 5, 2018.
9. Stupak O.S. Khalatov A.A. Super Effective Heat Pump. Vystavka innovatsiinykh proektiv naukovtsiv i studentiv KPI imeni Ihoria Sikorskoho dlia spivpratsi z investytsiinym fondom “Zhejiang Golden Egg Science and Technology”, м. Київ, 16 квітня 2018 р.
10. Stupak O.S. Khalatov A.A. Super Effective Heat Pump. Prezentatsiia-zakhyst proektiv na finansuvannia vid YeBRR v ramkakh III etapu Prohramy Klimatychnykh Vaucheriv, Kyiv, May 3, 2018.
11. Stupak O.S., Khalatov A.A. Shikhabutinova O.V. Rezultaty eksperymentalnoho doslidzhennia superefektyvnoho teplovoho nasosa dlia potreb opalennia prymishchen. XI Mizhnarodna konferentsiia «Problemy teplofizyky ta teploenerhetyky», Kyiv, May 21-22, 2019.

12. Stupak O.S. Super efficient heat pump. 2019 Hangzhou International Human Resources Exchanges and Cooperation Conference, Hangzhou, China, November 9-24, 2019.
13. Stupak O.S. Super efficient heat pump. 2019 Future Forum, Hangzhou, China, November 10, 2019.
14. Stupak O.S. Super efficient heat pump. Project Expert Review Meeting at China-Ukraine Aerospace Technology Research Institute, Hangzhou, China, November 12, 2019.
15. Stupak O.S. Super efficient heat pump. "Creating the World·Sailing to the Future" Innovation and Entrepreneurship Competition for Overseas Talent 2020 Hangzhou, Hangzhou, China, September 29, 2020.
16. Stupak O.S., Khalatov A.A., Hryshuk M.S. Superefektyvnyi teplovyyi nasos. Sikorsky challenge 2020, Kyiv, November 3-13, 2020.