

DOI 10.36074/logos-13.12.2024.043

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ТЕРМОСИФОННОГО ТЕПЛООБМІННИКА

**Чалаєв Джамалутдін Муршидович¹, Малащук Наталія Савівна²,
Грабова Тетяна Леонідівна³, Базєєв Ростислав Євгенович⁴**

1. д-р. техн. наук, ст. наук. співр., голов. наук. співр.
Інститут технічної теплофізики НАН України, УКРАЇНА
ORCID ID: 0000-0002-5154-4257

2. канд. техн. наук, наук. співр.
Інститут технічної теплофізики НАН України, УКРАЇНА
ORCID ID: 0000-0002-8648-1006

3. канд. техн. наук, ст. наук. співр., пров. наук. співр.
Інститут технічної теплофізики НАН України, УКРАЇНА
ORCID ID: 0000-0002-5194-2474

4. головний механік
Інститут технічної теплофізики НАН України, УКРАЇНА
ORCID ID: 0000-0002-6515-3492

Анотація. У статті представлені результати досліджень експериментального зразка термосифонного рекуперативного теплообмінника, виготовленого зі стандартного повітряного холодильного конденсатора із замкнутим контуром сполучених труб, з'єднаних між собою калачами. Показано, що за своєю теплопередавальною здатністю теплообмінники даної конструкції практично не поступаються традиційним апаратам на теплових трубах.

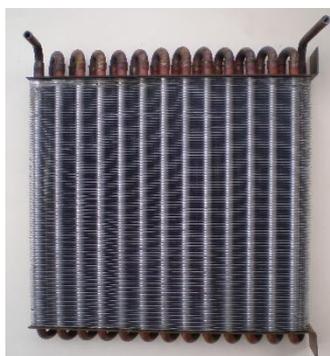
Вступ. У зв'язку з дефіцитом енергоносіїв, що зростає, нині гостро постає питання запровадження сучасних енергоощадних технологій та підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів. При реалізації заходів щодо енергозбереження перевага надається обладнанню з мінімальним терміном окупності, до якого насамперед варто віднести теплообмінники-рекуператори [1-5]. Рекуперативні теплообмінники широко використовуються в промислових технологічних процесах, системах

опалення, вентиляції та кондиціювання повітря. Серед різних типів рекуператорів все більше застосування знаходить теплообмінне обладнання, що працює за принципом парорідинного термосифона. Теплообмінники з двофазним термосифоном відрізняються компактністю та надійністю, здатні працювати при мінімальних температурних напорах, забезпечують надійний поділ потоків теплоносія [4]. Конструктивно термосифонні теплообмінники-рекуператори є пакетом теплових труб, розміщених в єдиному корпусі. Одна половина теплових труб знаходиться в зоні теплоносія, що гріє, інша - в зоні нагрівається. У цих теплообмінниках кожна теплова труба є незалежним елементом системи і є оребреною герметичну трубку, заправлену робочим агентом. Основна перевага традиційної конструкції рекуператорів з тепловими трубами – висока експлуатаційна надійність, оскільки розгерметизація кількох теплових труб не призводить до втрати працездатності всієї системи. До недоліків можна віднести низьку ремонтпридатність, обумовлену складністю діагностики виходу з ладу окремих теплових труб, а також велику трудомісткість виготовлення та відносно високу вартість цих пристроїв. З метою зниження трудомісткості виготовлення рекуператорів на теплових трубах та їх здешевлення вивчено можливість застосування у цих системах стандартних ореброваних теплообмінників. Раніше показано, що на основі промислових калориферів, а також повітряних конденсаторів та випарників, що застосовуються у холодильній техніці, можуть бути створені недорогі рекуператори тепла, які працюють за принципом термосифонних (гравітаційних) теплових труб.

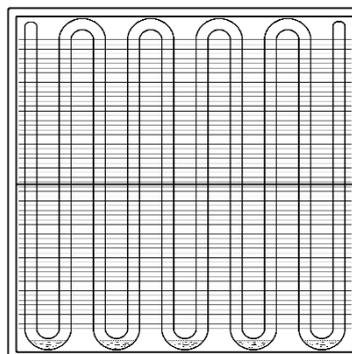
Матеріали та методи. Для визначення теплопередавальної здатності рекуператорів даної конструкції та виявлення їх експлуатаційних особливостей проведено лабораторні випробування експериментальних зразків апаратів, виготовлених на основі ореброваних теплообмінних секцій виробництва заводу «Кондиціонер», м. Краматорськ. Теплообмінна секція (рис. 1 а) має 2 ряди мідних труб діаметром 10 мм із щільно посадженими на них алюмінієвими ребрами. Труби послідовно з'єднані між собою калачами та утворюють суцільний змійовик із входом та виходом на крайніх трубках. У корпусі рекуператора (рис. 1 б) трубки теплообмінника розташовуються вертикально і теплообмінна секція розділена горизонтальною перегородкою на дві порожнини, ізольовані від перетоків повітря. Верхня частина теплообмінника є конденсаційною зоною термосифона і служить для підігріву холодного повітряного потоку, а нижня - випарною зоною термосифона і служить для відбору теплоти від гарячого повітряного потоку [6].

ABSCHNITT 15.

ENERGIE- UND ELEKTROTECHNIK



а



б

Рис. 1. **Експериментальний рекуперативний теплообмінник:**
а) секція орбренненого теплообмінника;
б) схема розміщення теплообмінника у корпусі рекуператора

На відміну від рекуператорів традиційної конструкції, в яких кожна трубка є окремо заправленою тепловою трубою, у даному апараті всі труби з'єднані між собою калачами та рекуператор має лише один патрубок для заливки агента та герметизації системи. Після заправки в систему рідкий агент спочатку знаходиться в ближніх до заправного штуцера трубках, і його перерозподіл теплообмінника відбувається вже в процесі роботи апарату: при подачі на рекуператор гарячого і холодного потоків повітря робочий агент шляхом послідовного випаровування і конденсації в трубках, що сполучаються, рівномірно розподіляється. Кількість заправленого в систему агента розраховується з умови заповнення всіх нижніх калачів теплообмінника приблизно на третину висоти. У порівнянні з традиційною схемою рекуператора на теплових трубах теплообмінник з подібною організацією контуру може мати ряд переваг теплотехнічного плану [6]:

– шляхом забезпечення можливості масо- та теплоперенесення не тільки вздовж окремих труб, а й між сусідніми трубками, створюються умови для згладжування можливих температурних нерівномірностей у потоці теплоносія (великий розкид температур часто спостерігається, наприклад, у потоці димових газів);

– спрощується процедура діагностики й дозаправлення системи при витокі робочого агента (у звичайному апараті виявити окрему теплову трубу, що вийшла з ладу, практично неможливо). Основним показником, що характеризує ступінь досконалості рекуперативних теплообмінників є ефективність E апарату. Величина E показує частку корисно використаного тепла і чисельно дорівнює відношенню фактично переданої теплоти максимально можливої. При однакових масових витратах теплоносія на

притоці та витяжці ефективність рекуператора виражається формулою:

$$E = \frac{t_x^{ex} - t_x^{in}}{t_2^{ex} - t_x^{in}}$$

У рекуператорах із тепловими трубами величина максимальної теоретичної ефективності залежить від числа рядів теплових труб. Оцінка граничної ефективності рекуператора з одним рядом теплових труб проводиться за схемою на рис. 2 а.

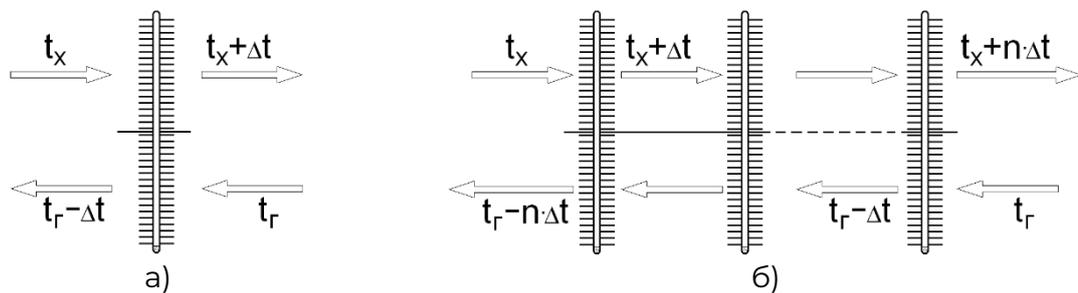


Рис. 2. Схема рекуператора на теплових трубах:

а) з одним рядом теплових труб; б) з кількома рядами теплових труб

У процесі роботи рекуператора передача теплоти від гарячого потоку холодного повітря здійснюється шляхом циркуляції робочого агента в теплової трубі [6]. Робочий агент випаровується в нижній гарячій зоні теплової труби й конденсується в холодній верхній зоні, після чого самопливом повертається вниз. В результаті холодний потік повітря нагрівається та приймає температуру $t_x + \Delta t$, а гарячий потік охолоджується до температури $t_r - \Delta t$. Під час досягнення температури $t_x + \Delta t = t_r - \Delta t$ передача тепла припиняється, оскільки температури в конденсаційній та випарній зонах теплової труби вирівнюються. Звідси випливає, що максимальне нагрівання теплоносія в однорядному рекуператорі на теплових трубах не може перевищувати величину $\Delta t = (t_r - t_x) / 2$ і гранична (теоретична) ефективність такого теплообмінника становить $E = 0,5$.

Розглянемо рекуператор із кількома рядами теплових труб (рис. 2 б). Аналогічно попередньому варіанту на виході з рекуператора має дотримуватися умова $t_x + n \cdot \Delta t = t_r - \Delta t$. З чого випливає:

$$\Delta t = \frac{t_r - t_x}{n + 1} \text{ та } E = \frac{n \cdot \Delta t}{t_r - t_x} = \frac{n}{n + 1}$$

Крива залежності граничної ефективності рекуператора від кількості рядів теплових труб (рис. 3) показує, що за 4-х і більше рядів ефективність цих апаратів наближається до показників рекуператорів роторного типу.

ABSCHNITT 15.

ENERGIE- UND ELEKTROTECHNIK

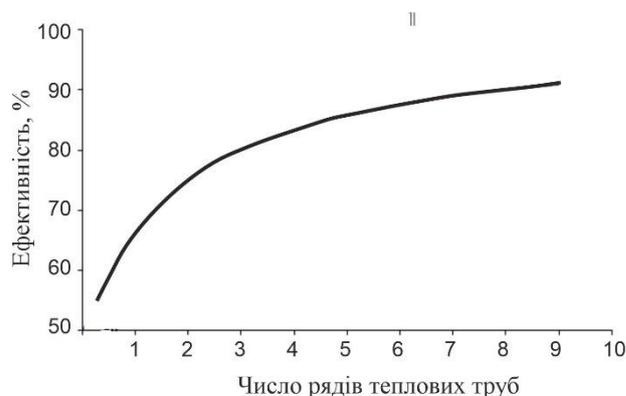


Рис. 3. Гранична ефективність рекуператора на теплових трубах

Для визначення робочих характеристик рекуперативних теплообмінників описаної вище конструкції був створений лабораторний стенд (рис. 4), основними елементами якого є вентилятор 1, що служить для подачі повітря рекуператор 2, каналний повітрянагрівач 3 і повітропровід 4, що з'єднує патрубки досліджуваного рекуператора.

З метою підтримки однакової витрати теплоносія через нагрівальну та охолоджувальну зони рекуператора рух повітря організовано таким чином, що повітряний потік послідовно проходить обидві зони рекуператора, і його циркуляція в апараті здійснюється за допомогою одного вентилятора. При цьому повітря нагнітається вентилятором в конденсаційну зону рекуператора, а вихідний патрубок конденсаційної зони повідомляється повітроводом з каналним повітрянагрівачем, встановленим на вході в зону випаровування.

Вибір температурних режимів роботи рекуператора та встановлення необхідної продуктивності повітря здійснюється за допомогою пульта управління стендом. Основними елементами системи управління є регулятор швидкості обертання двигуна вентилятора та регулятор потужності ТЕНа каналного повітрянагрівача. Апаратна частина вимірювальної системи стенда включає термоанемометр ТМ-1, цифровий вольтамперметр М890С, 8-каналний аналого-цифровий перетворювач І-7018 з конвертером інтерфейсу І-7052, що робить оцифрування вхідних сигналів і передачу даних в комп'ютер.

Робота стенда відбувається в такий спосіб. Вентилятор 1 подає холодне повітря в конденсаційну зону теплообмінника, розташованого в корпусі рекуператора 2. У теплообміннику холодне повітря сприймає теплоту від робочого агента, що конденсується в трубках, і нагрівається. Після проходження конденсаційної зони підігріте повітря по повітроводу 4 надходить в каналний повітрянагрівач 3 і догрівається в ньому до заданої температури. Гаряче повітря через вихідний патрубок каналного

повітрянагрівача подається в випарну зону рекуператора та охолоджується, віддаючи теплоту агенту, що кипить в трубках. Після проходження через випарну зону теплообмінника відпрацьоване повітря викидається. Експериментальні дослідження проводилися на рекуператорі розбірної конструкції, розрахованому на встановлення у ньому різної кількості теплообмінних секцій (рядів теплових труб). Рекуператор має металевий корпус із чотирма повітряними патрубками на бокових сторонах та знімну лицьову панель (рис. 4). У корпусі рекуператора можуть встановлюватись від однієї до чотирьох модульних теплообмінних секцій. У середній частині корпусу є рухома перегородка, яка поділяє секції теплообмінників на випарну та конденсаційну зони (рис. 5). Верхня порожнина є конденсаційною зоною термосифонної теплової труби, а нижня – зоною випаровування. При роботі рекуператора потік повітря, що нагрівається та охолоджується, рухаються в протитоці.

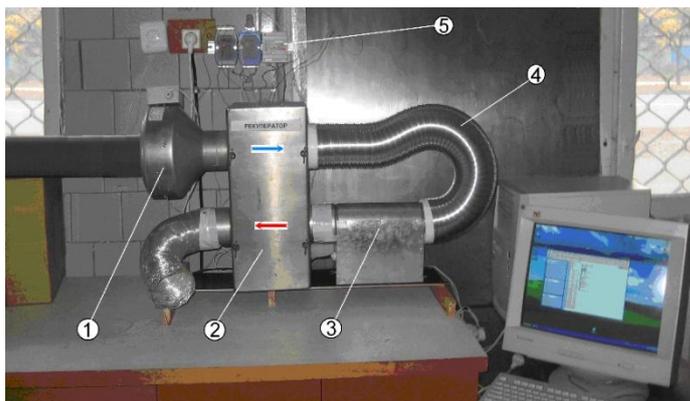


Рис. 4. Загальний вид станда для дослідження експериментальних зразків рекуператорів

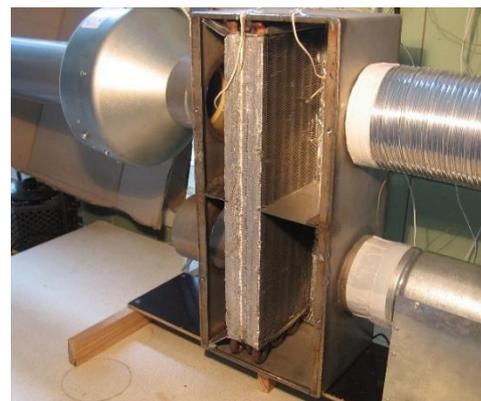


Рис. 5. Рекуперативний теплообмінник із знятою лицьовою панеллю

За основу модульної теплообмінної секції було взято оребрений трубчастий теплообмінник із двома рядами мідних труб та суцільним алюмінієвим ребром. Труби теплообмінника послідовно з'єднані між собою калачами й утворюють суцільний змійовик із входом та виходом на крайніх трубках. Технічні характеристики теплообмінника:

- розмір - 250 × 280(h) × 35 мм;
- крок ребра - 2,5 мм;
- товщина ребра – 0,15 мм;
- діаметр трубок – 10 мм;
- крок між трубками – 21 мм;

ABSCHNITT 15.

ENERGIE- UND ELEKTROTECHNIK

- кількість рядів труб – 2;
- теплообмінна поверхня – 1,8 м².

Виготовлення термосифонної теплообмінної секції включало вакуумування трубного пучка теплообмінника, заповнення його необхідною кількістю робочого агента та герметизацію.

Методика експериментальних досліджень передбачала отримання робочих характеристик рекуператора як залежності його ефективності від швидкості теплоносія при різних кількостях рядів теплових труб. Згідно з методикою, результати фіксувалися тільки після встановлення теплової рівноваги в рекуператорі. Досліди проводилися при температурах теплоносія до 90 °С та швидкостях від 0,5 до 4,5 м/с. При обробці експериментальних даних враховувалися ті вимірювання, у яких температурне рівновагу в рекуператорі спостерігалось протягом щонайменше 30 хв.

Результати та їх обговорення. Результати обробки в координатах «ефективність-швидкість теплоносія» (рис. 6) показали, що при низьких швидкостях повітря ефективність рекуператора близька до величини теоретичної межі.

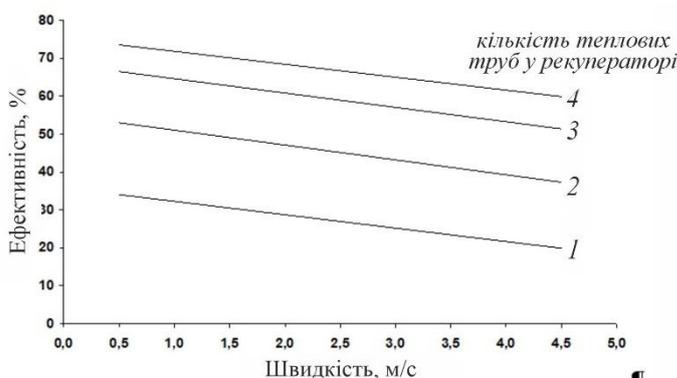


Рис. 6. Залежність ефективності рекуператора від швидкості руху теплоносія

Для перевірки наявності теплоперенесення між сусідніми трубками теплообмінника та оцінки ступеня його ефективності було виміряно поле температур поперечного перерізу повітроводів на всіх патрубках рекуператора. Вимірювання показали велику температурну нерівномірність потоку гарячого повітря на виході з каналного повітрянагрівача, що було викликано особливістю конструкції нагрівального елемента (рис. 7 а). Ступінь розкиду температури залежала від швидкості повітря в каналі та при деяких режимах перевищувала 10-15 °С. На решті патрубків рекуператора температура повітряного потоку була практично однаковою по всьому перерізу повітроводу.

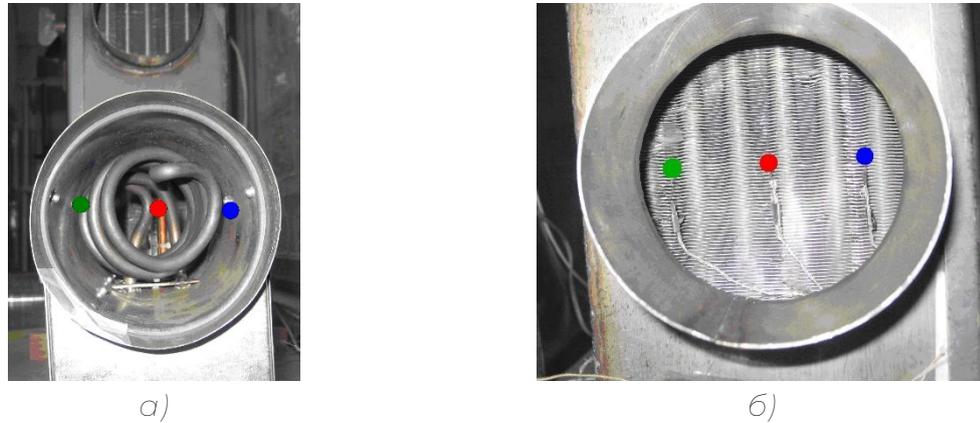


Рис. 7. Точки вимірювання температур у каналному повітронагрівачі (а) та патрубках рекуператора (б)

На рис. 8 представлено зміну температур у процесі експерименту та характер розкиду температур при різних швидкостях руху повітря.

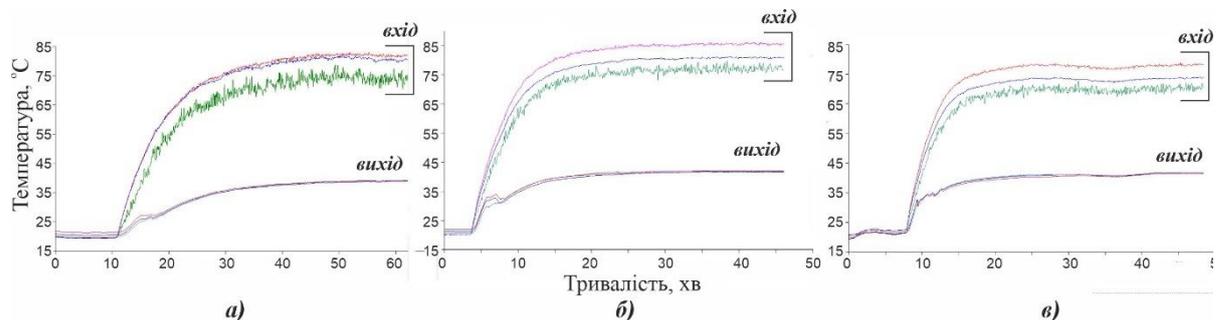


Рис. 8. Розподіл температур повітря по перерізу повітроводу на вході та виході рекуператора при швидкості руху повітря: а) $V=0,6$ м/с; б) $V=1,7$ м/с; в) $V=3,5$ м/с

Температури вимірювалися за допомогою термопар у центральній та периферійній частинах повітроводу (рис. 7 б) на вході та виході випарної зони теплообмінника.

Як видно з графічних залежностей, при всіх режимах руху температура повітряного потоку на вході в теплообмінник має велику нерівномірність по перерізу. На виході з теплообмінника спочатку спостерігалися невеликі температурні збурення, спричинені утворенням та зливом плівки конденсату у конденсаційній зоні. Після виходу рекуператора на стаціонарний режим роботи (приблизно на 15-30-й хвилини) температура потоку на виході з теплообмінника стала однаковою по всій ширині перерізу, що підтверджує

ABSCHNITT 15.

ENERGIE- UND ELEKTROTECHNIK

висловлене нами припущення про здатність рекуператора даної конструкції згладжувати температурні нерівномірності повітряного потоку.

Висновки. Експериментально показано, що ефективні рекуперативні теплообмінники, аналогічні апаратам на теплових трубах, можуть бути створені на базі стандартних повітряних конденсаторів та випарників зі з'єднаними калачами трубами, які застосовуються в холодильній техніці. Порівняно з традиційною схемою рекуператора у вигляді пакета окремих теплових труб, теплообмінник з подібною організацією контуру може мати ряд переваг теплотехнічного і економічного плану: за рахунок можливості масо- і теплопереносу між сусідніми трубками забезпечується рівномірність по фронту температури повітряного потоку, що нагрівається, спрощується процедура діагностики і дозаправки системи в разі витoku робочого агента. Окрім цього, застосування стандартних теплообмінних апаратів і простота технології виготовлення термосифонного рекуперативного теплообмінника даної конструкції дозволить значно зменшити вартість рекуператорів на теплових трубах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [1] Dabizha, N., Sniezhkin, Y., Chalaev, D. & Malashchuk, N. (2019) Research in low-temperature heat pump drying. *2nd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering»*, Lviv Polytechnic National University, 433. Lviv, Ukraine. <https://doi.org/10.23939/cte2019.01.098>.
- [2] Снежкін, Ю.Ф., Чалаєв, Д.М., Дабіжа, Н.О., Уланов, М.М. & Малащук, Н.С. (2016-2020) Ефективність використання теплових насосів в процесах сушіння. *Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд. Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2016-2020 рр.* Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, 410–420.
- [3] Снежкін, Ю.Ф., Чалаєв, Д.М., Шаврин, В.С. & Дабіжа, Н.О. (2009) *Теплові насоси в системах теплохолодопостачання.* Ін-т техн. теплофізики. Київ, «Поліграф-Сервіс», 104.
- [4] Vasiliev L.L. (2005) Heat pipes in modern heat exchangers. *Applied Thermal Engineering.* (25), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.12.004>.
- [5] Малащук, Н., Герштун, Д. & Базеев, Р. (2022) Дослідження енергетичних характеристик в полімерному теплообміннику-утилізаторі. Матеріали XXIII міжнародної науково-практичної онлайн-конференції «Відновлювальна енергетика та енергоефективність в XXI столітті» 19-20 травня,. Київ, 294-296. Вилучено з: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/63191>.
- [6] Malashchuk, N.S., Chalaev, D.M. & Dabizha, N.O. (2021) Experimental investigation of heat transfer in a recuperator of a convective dryer. *SWorldJournal.* (8), 42–49. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2021-08-01-058>.