

---

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.02.058>

УДК 536.11

**А.А. Халатов<sup>1</sup>, О.С. Ступак<sup>1</sup>, М.С. Гришук<sup>2</sup>, О.І. Галака<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

<sup>2</sup> ПАТ “БРОТЕП-ЕКО”, Бровари

E-mail: artem.khalatov1942@gmail.com, stupakalewka@gmail.com

## **Новий комбінований термодинамічний цикл**

*Представлено академіком НАН України А.А. Халатовим*

*Розглянуто новий термодинамічний цикл, що використовує комбінацію циклів Майсоценко і Ренкіна. Експериментальне дослідження підтвердило високу ефективність циклу, яка вища за всі відомі цикли.*

**Ключові слова:** *термодинамічний цикл, непряме випарне охолодження, температура сухого і мокрого термометра, коефіцієнт досконалості.*

Проблема зниження вартості локального теплопостачання населення України залишається гострою і є одним з головних питань енергетичної безпеки країни. Більш широке використання місцевих видів палива (торф, біомаса) частково вирішує цю проблему, але призводить до значного погіршення локального екологічного становища внаслідок недосконалості теплогенеруючих установок. Теплові насоси, що працюють за циклом Ренкіна та використовують енергію навколишнього середовища (повітря, землі чи води), забезпечують високий коефіцієнт перетворення енергії на рівні 3–4, але характеризуються підвищеною питомою вартістю (понад 1000 євро за 1 кВт встановленої теплової потужності) і тривалим строком повернення інвестицій (8–10 років). Відсутність вітчизняного виробництва компресорів фреонового типу обумовлює високу вартість теплових насосів.

Тому пошук нових схем и створення більш ефективних, екологічно чистих і дешевих установок локального теплопостачання є однією з головних проблем теплоенергетики України. Оскільки в Україні протягом останніх років спостерігається надлишок виробництва електричної енергії, то найбільш перспективним напрямком уявляється комбінація термодинамічних циклів з використанням електричної енергії.

В Україні понад 30 років тому В. Майсоценко розробив новий термодинамічний цикл [1, 2], який використовує психрометричну енергію навколишнього середовища у формі різниці температур сухого і мокрого термометра. Цикл реалізується в тепломасообмінному апараті непрямого випарного типу охолодження із системою сухих і вологих каналів не-

© А.А. Халатов, О.С. Ступак, М.С. Гришук, О.І. Галака, 2018

великої висоти, в яких організовані процеси випаровування води та її конденсації. В результаті атмосферне повітря в апараті М-циклу розділяється на охолоджене повітря та насичене (до 100 %) повітря з початковою температурою, але більш високою ентальпією за рахунок використання психрометричної енергії. Оскільки ступінь термодинамічної досконалості термодинамічних процесів, що відбуваються в апараті непрямого випарного охолодження, близький до одиниці, теоретичною межею охолодження повітря в циклі є температура точки роси. Такого результату неможливо досягнути за допомогою інших термодинамічних циклів.

Відмінною особливістю конструкції тепломасообмінного апарата за М-циклом є відсутність компресора і фреону. Для роботи тепломасообмінного апарата необхідна тільки електрична енергія для роботи вентилятора, який подає повітря в канали апарата. Як робоче тіло для виконання термодинамічних процесів випаровування та конденсації використовується вода або інші рідини.

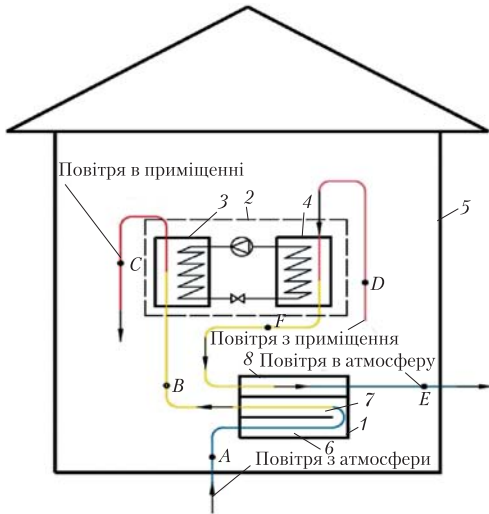
Однією з важливих властивостей М-циклу є висока ефективність в області високих температур наволишнього середовища, тобто там, де цикл Ренкіна має низьку ефективність. Деякі особливості застосування М-циклу в області підвищеної вологості повітря не є обмеженням, оскільки нині створено ефективні системи осушення повітря [3]. Цикл може використовуватися в різноманітних технічних застосуваннях [1, 2].

У США проф. В. Майсоценко реалізував ідею у вигляді безкомпресорного і безфреонового кондиціонера, який витрачає в 8–10 разів менше електричної енергії на виробництво одиниці холоду, ніж усі відомі пароконпресорні холодильні установки, що працюють за циклом Ренкіна. В даний час кондиціонери за М-циклом серійно випускаються в США та деяких країнах Азії [4].

**Комбінований цикл Майсоценко та Ренкіна.** Цикл Майсоценко може застосовуватися для цілей локального теплопостачання, але в такому випадку ефективність його використання недостатньо висока. На підставі термодинамічного аналізу у авторів виникла інноваційна ідея послідовного застосування циклів Майсоценко та Ренкіна для більш ефективного використання кращих якостей циклів і створення ультраефективної установки локального теплопостачання. Установки повітряного теплопостачання з послідовним використанням циклів Майсоценко та Ренкіна запатентовано авторами в Україні [5–7].

Для перевірки висунутої ідеї одна із схем установки комбінованого циклу по заявці на винахід [7] була реалізована авторами на території ПАТ “БРОТЕП-ЕКО” (м. Бровари). На даному етапі окремі компоненти установки були закуплені в Компанії “Coolerado” (США). Вона включає (рис. 1) повітряний тепловий насос за циклом Ренкіна та тепломасообмінний апарат непрямого випарного охолодження за циклом Майсоценко (показана тільки одна чарунка, що включає в себе два сухі й один вологий канал).

Тепломасообмінний апарат за М-циклом 1 забезпечує виробництво вологого насиченого повітря підвищеної ентальпії у вологому каналі 7 за рахунок використання психрометричної енергії наволишнього середовища та високого рівня рекуперації в каналі 8 (т. В). Повітря 100 % вологості надходить до конденсатора теплового насоса 3 за циклом Ренкіна, де за рахунок підігріву повітря досягаються параметри, які відповідають санітарним умовам системи теплопостачання (т. С). Після циркуляції в приміщенні (т. D) повітря поступає до випарника теплового насоса 4, де воно охолоджується і надходить у сухий канал



**Рис. 1.** Загальна схема установки повітряного теплопостачання за комбінованим термодинамічним циклом: 1 – тепломасообмінний апарат за М-циклом; 2 – тепловий насос за циклом Ренкіна; 3 – конденсатор теплового насоса; 4 – випарник теплового насоса; 5 – приміщення; 6 – робочий сухий канал; 7 – робочий вологий канал; 8 – сухий канал конденсації

конденсації 8 апарата М-циклу. Після охолодження потоку до точки роси починається конденсація вологи з виділенням теплоти, причому тепло, яке виділяється, поступає до вологого каналу (рекуперації), використовується для випаровування води і отримання насиченого повітря.

На рис. 2 наведено термодинамічні процеси в I–D діаграмі вологого повітря за результатами одного з експериментів (дослід № 3, таблиця). На рис. 2 точка A визначається параметрами вхідного атмосферного повітря. Теоретично атмосферне повітря в кінці сухого каналу 6 досягає температури точки роси, а на виході з вологого каналу насичене повітря відповідає параметрам у т. B. В адіабатному апараті М-циклу температура вологого повітря має відповідати параметрам у т. E. Однак внаслідок конденсації вологи в сухих каналах 8, виділення теплоти конденсації і її передачі у вологий канал (процес D–F–E) вона відповідає умовам у т. B.

Процес B–C відповідає підігріву повітря за допомогою конденсатора теплового насоса Ренкіна для досягнення санітарних умов. Процес C–D – охолодження повітря в приміщен-

**Результати експериментальних досліджень**

Номер дослід	Властивості навколишнього повітря			Властивості повітря після вологих каналів апарата М-циклу			Вентиляційні викиди з приміщення			Властивості повітря, що видаляється, після апарата М-циклу в атмосферу			ККД апарата М-циклу за температурою, %	ККД апарата М-циклу за ентальпією, %	Ефективність установки, COP
	t, °C	φ, %	h, кДж/кг	t, °C	φ, %	h, кДж/кг	t, °C	φ, %	h, кДж/кг	t, °C	φ, %	h, кДж/кг			
1	-5	80	0	3,5	100	16	18	45	32	-0,2	100	9	79,1	71,9	7,44
2	-0,8	65	4,9	6	100	21	18,4	36	31	0,7	98	11	92,2	77,6	7,46
3	0,9	63,5	7,4	11,4	100	33	21,2	42,7	39	3,9	100	17	85,2	70,2	9,73
4	1,5	60	7	8,7	100	27	18,8	43	34	4,2	100	17,5	84,4	61,1	8,39
5	1,8	75	9,5	8,7	100	27	18,3	38	31	5	90	17,5	80,6	62,8	7,8
6	4	70	13	8,7	100	27	16,4	52	32,5	5,2	100	19,5	90,3	66,7	8,74
7	5,6	86	18,1	11	100	32	17	55	35	7,4	100	24	84,5	64,9	6,98

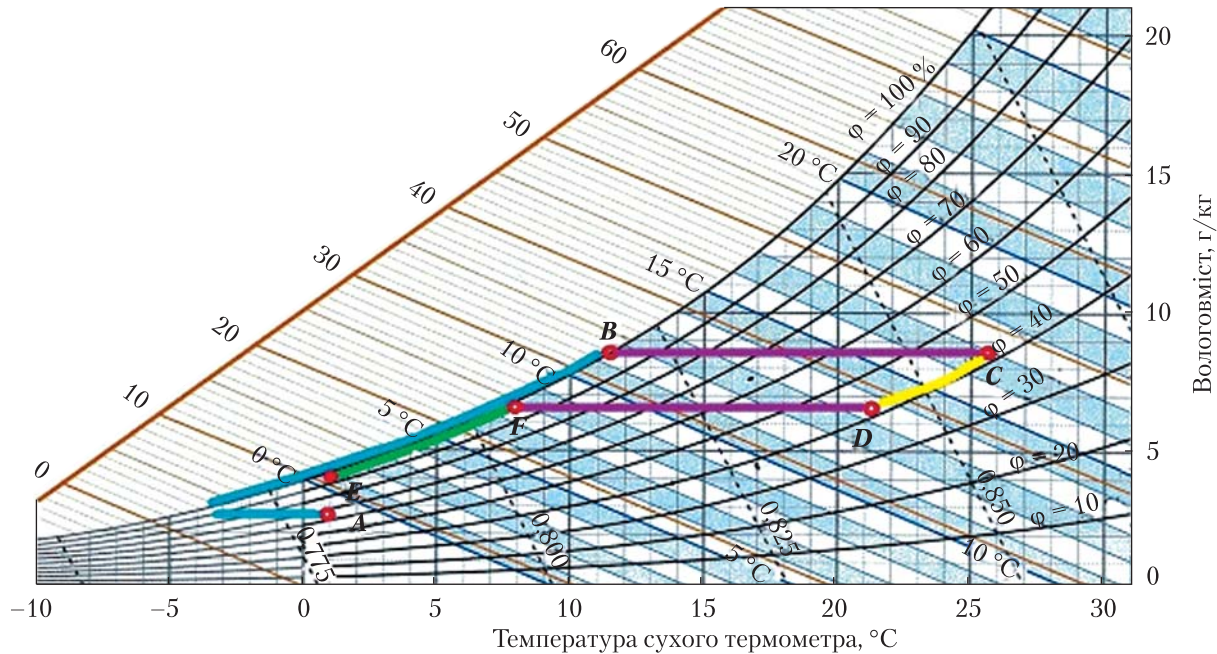


Рис. 2. I–D діаграма комбінованого циклу Майсоценко і Ренкіна

ні, а процес  $D-F-E$  – охолодження вологого повітря випарника теплового насоса Ренкіна (частина процесу  $D-F$ ), охолодження повітря до температури точки роси (т.  $F$ ) в сухому каналі  $\delta$  і подальша конденсація вологи в ньому ( $F-E$ ). Таким чином, процес  $D-F-E$  (за винятком частини процесу  $D-F$ ) визначає теплоту рекуперації (повернення теплоти) в апараті М-циклу.

Вихідні умови відповідають т.  $E$ . Теоретична температура повітря, яке видаляється з приміщення, може відповідати температурі мокрого термометра навколишнього середовища. Це означає, що за рахунок низького ступеня необоротності і високого ступеня регенерації ефективність тепломасообмінного апарата непрямого випарного охолодження за циклом Майсоценко може наближатися до одиниці. Як відомо, ефективність кращих промислових теплообмінних “сухих” апаратів становить 0,7–0,75. Як наслідок, комбінація двох циклів забезпечує високий синергетичний ефект запропонованої термодинамічної схеми. Високий коефіцієнт досконалості циклу забезпечується за рахунок використання енергії навколишнього середовища в циклах Майсоценко (психрометрична енергія) та Ренкіна, підвищення ефективності теплового насоса Ренкіна завдяки використанню теплоти конденсатора і випарника, але головним чином внаслідок високого рівня регенерації теплоти в апараті М-циклу при конденсації вологи із витяжного повітря.

В експериментах вимірювалися параметри, необхідні для визначення ефективності тепломасообмінного апарата Майсоценко і загальної ефективності установки (підготовки повітря до санітарних норм). Вони включають температуру, відносну вологість та масову витрату повітря, для цього у повітропроводах у всіх ключових точках установки встановлено термометри та гігрометри (точки  $A, B, C, D, E, F$ ), а на вході в апарат Майсоценко – витратоміри повітря (точки  $A, E$ , див. рис. 1).

**Результати тестування.** Ефективність тепломасообмінного апарата Майсоценко обчислювалася за класичною формулою:

$$\eta^t = \frac{t_D - t_E}{t_D - t_A}. \quad (1)$$

Оскільки даний апарат безпосередньо залежить від зміни фазового стану водяних парів у повітрі, то ефективність також обраховується і за ентальпією повітря за формулою

$$\eta^h = \frac{h_D - h_E}{h_D - h_A}. \quad (2)$$

Загальна ефективність установки комбінованого циклу визначається за допомогою параметра COP (coefficient of performance) за формулою

$$\text{COP} = \frac{\text{користь}}{\text{затрата}} = \frac{Q_{ERV} + Q_{TH}}{N_{ERV} + N_{TH}}. \quad (3)$$

Експериментальні дослідження були проведені в січні—березні 2016—17 рр. у двох різних режимах роботи апарата М-циклу — при різній температурі і вологості атмосферного повітря. У першому режимі апарат працював у сухому режимі, тобто повітря у вологому робочому каналі проходило по сухому каналу і не зволожувалося, а лише нагрівалося. Ефективність роботи теплообмінного апарата була нижче 60 %. Експериментальні дослідження в другому режимі проводилися з повноцінною роботою тепломасообмінного апарата М-циклу з подачею води до вологих каналів. Результати досліджень представлені в таблиці, де  $t$  — температура,  $\phi$  — відносна вологість,  $h$  — ентальпія повітря.

Як впливає з отриманих результатів, ККД апарата за М-циклом підвищився до 79,5—92,2 %, що значно вище результатів, отриманих для “сухого” апарата. Оскільки температура і ентальпія повітря на виході з апарата М-циклу в усіх випадках вище атмосферних умов, то вимоги повного охолодження потоку в сухих каналах апарата М-циклу (до температури мокрого термометра) не були досягнуті. Вологість вихідного повітря практично у всіх випадках становить 100 %, тобто процес конденсації вологи в апараті М-циклу повністю не завершується. Очевидно, для умов експерименту серійний апарат виробництва США, застосований в установці, не забезпечує оптимальних умов охолодження повітря. Незважаючи на це, залежно від умов експерименту ефективність установки (COP) становить 6,98—9,73, що є достатньо високим показником. Це підтверджує перспективність ідеї комбінації (послідовного застосування) циклів Майсоценко та Ренкіна для отримання високих показників ефективності установок локального теплопостачання. Розробка більш досконалих апаратів М-циклу дасть змогу створювати установки локального теплопостачання з коефіцієнтом 9—11.

У проведених експериментах ефективність тепломасообмінного апарата М-циклу для потреб рекуперації повітря на базі системи повітряного опалення приміщень спостерігалася на рівні 85 % за температурою та близько 75 % за ентальпією. Завдяки тому, що під час утилізації теплоти з потоку повітря, що видаляється, конденсуються водяні пари, і досягається вища ефективність рекуперації. Цей процес добре простежується на діаграмі, наприклад для досліді № 3 (див. таблицю).



Таким чином, запропонована нова концепція ультраефективної установки локального теплопостачання на основі комбінації циклів Майсоценко і Ренкіна. Результати експериментів підтвердили високу ефективність установки комбінованого циклу (COP), яка становить від 7 до 9,7 залежно від умов навколишнього середовища.

Висока ефективність установки визначається використанням енергії навколишнього середовища в циклах Майсоценко та Ренкіна, більш ефективним використанням теплоти конденсатора і випарника теплового насоса, але головним чином високим ступенем регенерації теплоти в циклі Майсоценко.

Теоретично застосування комбінованого циклу дає змогу охолоджувати повітряний потік, що виходить, до температури точки роси, тобто забезпечити практично повну утилізацію теплової енергії в циклі.

Подальше дослідження буде направлено на створення установки локального теплопостачання з оптимальними характеристиками, тоді стане можливим досягти показника COP на рівні 9–11.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Khalatov A., Karp I., Isakov B. Prospects of the Maisotsenko thermodynamic cycle application in Ukraine. *Int. J. Energy Clean Environ.* 2011. **12**, Iss. 2-4. P. 141–157. doi: <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2012005916>
2. Халатов А.А., Карп І.М., Ісаков Б.В. Термодинамічний цикл Майсоценка і перспективи його застосування в Україні. *Вісн. НАН України.* 2013. № 2. С. 38–49.
3. Хмельнюк М.Г., Важинский Д.И., Жихарева Н.В. Современные технологии осушения воздуха. *Холодильна техніка та технологія.* 2014. № 3. С. 15–21.
4. COOLERADO. URL: <https://www.coolerado.com> (Дата звернення: 25.09.2017).
5. Система повітряного опалення: пат. на корисну модель 111096 Україна. МПК F24F12/00, F24D5/00; заявл. 09.06.2016. Опубл. 25.10.2016.
6. Система повітряного опалення: заявка на пат. винаходу а2016 09765; заявл. 22.09.2016.
7. Система повітряного опалення: заявка на пат. винаходу а2017 06465; заявл. 23.06.2017.

Надійшло до редакції 02.11.2017

#### REFERENCES

1. Khalatov, A., Karp, I. & Isakov, B. (2011). Prospects of the Maisotsenko thermodynamic cycle application in Ukraine. *Int. J. Energy Clean Environ.*, 12, Iss. 2-4, pp. 141-157. doi: <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2012005916>
2. Khalatov, A. A., Karp, I. N. & Isakov, B. V. (2013). Maisotsenko thermodynamic cycle and prospects of its application in Ukraine. *Visn. Nac. Acad. Nauk Ukr.*, No. 2, pp. 38-49 (in Ukrainian).
3. Khmelniuk, M., Vazhynskiy, D. & Zhikhareva, N. (2014). Modern dehumidification technologies. *Holodilnaya tehnika i tehnologia*, No. 3, pp. 15-21.
4. COOLERADO. (2011). Retrieved from <https://www.coolerado.com>
5. Utility model pat. 111096 UA, IPC F24F12/00, F24D5/00, Air cooling system, Stupak, O.S., Khalatov, A.A., Galaka, O.I., Grishuk, M.S., Publ. 25.10.2016 (in Ukrainian).
6. Pat. application a2016 09765, Air cooling system, Stupak, O.S., Khalatov, A.A., Galaka, O.I., Grishuk, M.S., appl. date 22.09.2016 (in Ukrainian).
7. Patent application a2017 06465, Air cooling system, Stupak, O.S., Khalatov, A.A., Galaka, O.I., Grishuk, M.S., appl. date 23.06.2017 (in Ukrainian).

Received 02.11.2017

А.А. Халатов<sup>1</sup>, О.С. Ступак<sup>1</sup>, М.С. Гришук<sup>2</sup>, А.И. Галака<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев

<sup>2</sup> ЧАО "БРОТЕП-ЭКО", Бровары

E-mail: artem.khalatov1942@gmail.com, stupakalewka@gmail.com

#### НОВЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ

Рассмотрен новый термодинамический цикл, использующий комбинацию циклов Майсоценко и Ренкина. Экспериментальное исследование подтвердило высокую эффективность цикла, которая выше всех известных циклов.

**Ключевые слова:** термодинамический цикл, косвенно-испарительное охлаждение, температура сухого и мокрого термометра, коэффициент совершенства.

A.A. Khalatov<sup>1</sup>, O.S. Stupak<sup>1</sup>, M.S. Grishuk<sup>2</sup>, O.I. Galaka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Engineering Thermophysics of the NAS of Ukraine, Kiev

<sup>2</sup> BROTEP-ECO, Brovary

E-mail: artem.khalatov1942@gmail.com, stupakalewka@gmail.com

#### NOVEL COMBINED THERMODYNAMIC CYCLE

The novel thermodynamic cycle is suggested, by using a combination of the Maisotsenko and Ranque cycles. The experimental study has confirmed the superefficiency of the cycle that is greater than that of all currently known cycles.

**Keywords:** thermodynamic cycle, indirect-evaporative cooling, dew point temperature, wet bulb temperature, coefficient of performance.