

УДК 536.7

А.А. ХАЛАТОВ<sup>1</sup>, І.М. КАРП<sup>2</sup>, Б.В. ІСАКОВ<sup>3</sup><sup>1</sup> Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України  
вул. Желябова, 2а, Київ, 03057, Україна<sup>2</sup> Інститут газу Національної академії наук України  
вул. Дегтярівська, 39, Київ, 03113, Україна<sup>3</sup> Державне підприємство «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря» — «Машпроект»  
просп. Жовтневий, 42а, Миколаїв, 54018, Україна

## ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ ЦИКЛ МАЙСОЦЕНКА І ПЕРСПЕКТИВИ ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ В УКРАЇНІ

*У статті наведено огляд робіт, присвячених новому термодинамічному циклу Майсоценка та можливості його використання на різних об'єктах промисловості України. Серед них енергетичні газові турбіни, кондиціонери й охолоджувачі повітря, опріснювачі морської води, пальники з високим вмістом вологи в повітрі та деякі інші. Показано, що пристрої на основі циклу Майсоценка мають високі техніко-економічні показники, які перевершують характеристики інших сучасних установок.*

*Ключові слова: непряме випарне охолодження, мокрий термометр, точка роси, психрометрична діаграма, газові турбіни.*

---

### ВСТУП

Швидке зростання вартості вуглеводнів і забруднення навколишнього середовища спонукають людство шукати альтернативні джерела енергії. Одним із потенційних невичерпних джерел енергії, наявних практично в будь-якій точці світу, є природна нерівновага атмосферного повітря у формі різниці температур сухого і мокрого термометрів (психрометрична різниця температур, або різниця температур атмосферного повітря і повітря, що контактує з водою, яка випаровується).

До того як стали відомими дослідження американського вченого, колишнього нашого співвітчизника професора В. Майсоценка, цю різницю, зважаючи на її незначну величину, практично не використовували. В. Майсоценко першим показав, як можна

застосувати її на практиці і створити нові технології й устаткування. Вбачається, що робота В. Майсоценка є новим та істотним кроком у термодинаміці вологого газу, а її результати можуть сприяти значному прориву в галузі створення енергетичних установок з високими характеристиками й нових тепло- і масообмінних та енергоощадних технологій. Нижче розглянуто деякі приклади практичного використання циклу Майсоценка, що становлять значний інтерес для економіки України.

### ЦИКЛ МАЙСОЦЕНКА

Висока психрометрична різниця температур може бути реалізована в тепломасообмінному апараті непрямого випарного охолодження з протитечієм рухом повітря (газу) в системі сухих і вологих каналів. У такому пристрої створюються розділені потоки повітря, один із яких штучно зволожується, а інший — охолоджується. Оскільки

процеси тепло- і масообміну, що відбуваються в апараті, близькі до оборотних термодинамічних процесів, у ньому досягається максимальний ефект охолодження повітря з мінімальними втратами енергії. Якщо ступінь термодинамічної досконалості системи близький до одиниці, теоретичною межею охолодження повітря в протитечійному апараті непрямого випарного охолодження є температура точки роси. Зазначимо, що в традиційному апараті випарного охолодження граничною температурою охолодження є температура охолоджуваного повітря за мокрим термометром.

Грунтуючись на теоретичних положеннях термодинаміки вологих потоків, професор В. Майсоценко запропонував новий термодинамічний цикл, відомий як цикл Майсоценка (Maisotsenko cycle), або М-цикл (M-cycle), і запатентував його в різних країнах. Цей винахід відкрив шлях до використання психрометричної різниці температур для різних застосувань [1–4], що дало змогу створити ефективні пристрої відновлюваної і традиційної енергетики, а також нові тепло- і масообмінні технології з високими техніко-економічними показниками [3–8].

Схему комірки протитечійного тепломасообмінного апарата з двома незалежними потоками повітря і дискретним подаванням охолодженого повітря показано на рис. 1а [5–8]. Зовнішній потік, потрапляючи в сухий робочий канал, охолоджується внаслідок контакту із внутрішньою поверхнею вологого робочого каналу, де відбувається випаровування води. В ідеальних умовах на вході у вологий робочий канал повітря досягає насиченого стану, а його температура – температури точки роси (рис. 1, точка 3). Під час випаровування води у вологому робочому каналі температура повітря, що контактує з вологою стінкою, поступово знижується, оскільки на випаровування витрачається власна енергія повітря, що відповідає прихованій теплоті випаровування. Рухаючись у вологому каналі, повітря зберігає насичений стан, а його абсолютна воло-

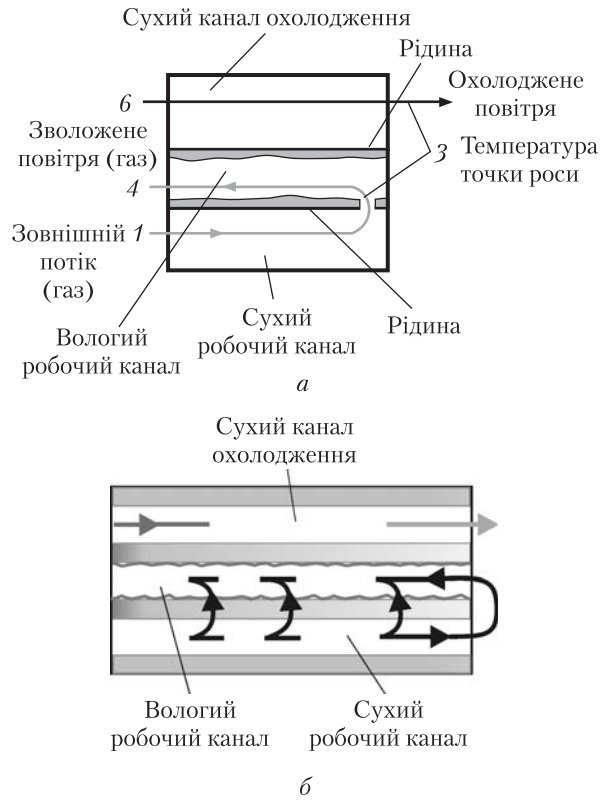
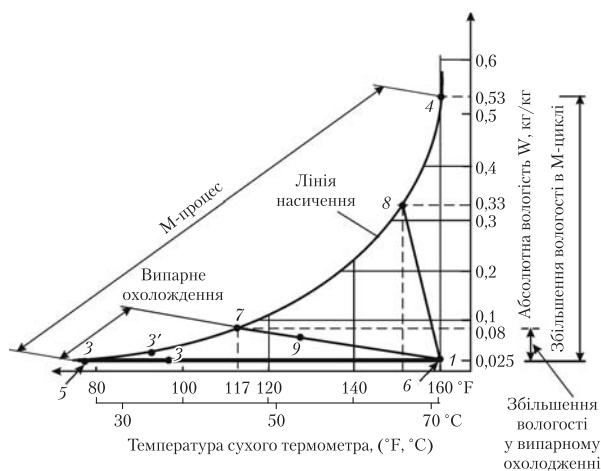


Рис. 1. Комірка протитечійного тепломасообмінного апарата непрямого випарного охолодження [1–4]: а – схема з дискретним подаванням охолодженого повітря (точки 1, 3, 4, 6 показано на рис. 2); б – схема з безперервним подаванням охолодженого повітря

гість зростає. В окремих випадках можливе використання схеми з безперервним подаванням охолодженого повітря у вологий канал (рис. 1б).

Ідеальний протитечійний тепломасообмінний апарат непрямого випарного охолодження є системою елементарних комірок на зразок зображеної на рис. 1. Його лабораторні випробування показали, що температура повітря на виході з сухого робочого каналу і сухого каналу охолодження близька до температури точки роси, а на виході з вологого каналу – до температури мокрого термометра (100%-ва вологість).

Ідеальний цикл Майсоценка зображено на рис. 2, лінія 1–3–4–1 [1–3, 5, 8]. За початкової температури повітря (71,1°C) абсолютна вологість повітря в М-циклі зростає



**Рис. 2.** М-цикл на психрометричній діаграмі [1, 2]: 1–3 – охолодження повітря в сухому робочому каналі; 3–4 – нагрівання і зволоження повітря у вологому робочому каналі; 4–1 – повернення повітря до вихідного стану

з 0,025 до 0,53 кг/кг, тобто збільшується в понад 20 разів. Зростання теплоємності вологого повітря визначається різницею ентальпій у точках 3 і 4, а зниження температури повітря в сухому каналі охолодження – різницею температур у точках 6 і 5. Вологість потоку, що досягається в ідеальному М-циклі, зростає більш ніж у 6,5 раза, тоді як у традиційній схемі випарного охолодження – лише в 3,2 раза (0,025–0,08 кг/кг; рис. 2). Збільшення ентальпії вологого потоку в М-циклі (лінії постійної ентальпії на рис. 2 не показано) більш ніж у 4 рази відкриває великі можливості в тепломасообмінних технологіях.

Охолодження повітря в ідеальному М-циклі становить 45,5°С (від 71,1 до 25,6°С), а в разі ідеального випарного охолодження (лінія 1–7) – тільки 23,9°С (від 71,1 до 47,2°С). Чим вища температура вхідного повітря, тим більший ефект охолодження повітря досягається в сухому каналі. У цьому виявляється одна з важливих властивостей М-циклу – збільшення його ефективності зі зростанням температури навколишнього середовища (повітря на вході), тоді як ефективність холодильного циклу в такому разі

знижується. За високої вологості вхідного повітря (газу) ефективність М-циклу можна підвищити за допомогою осушування повітря на вході. У реальних умовах охолодження повітря в сухому робочому каналі характеризує лінія 1–2, а охолодження, нагрівання і зволоження повітря у вологому робочому каналі – лінія 2–3–8. Випарне охолодження в реальних умовах характеризується лінією 6–9 на рис. 2.

Цикл Майсоценка можна застосовувати не лише в системах кондиціонування повітря. Велику різницю густини охолоджуваного повітря, що нагрівається, доцільно використати як рушійну силу в енергетичних і тепло- й масообмінних технологіях. У всіх випадках через сухий і вологий робочі канали рухається атмосферне повітря (або використаний газ). У системах кондиціонування через сухий канал охолодження проходить повітря з атмосфери, а в енергетичних, тепло- і масообмінних технологіях – вихлопний газ енергетичних установок або охолоджувана робоча рідина (наприклад, у конденсаторі). Оскільки в пристроях на основі М-циклу використовується потенційна енергія навколишнього середовища (вологого повітря атмосфери), то вартість виробленої енергії істотно менша порівняно з іншими технологіями відновлюваної енергетики.

Основними перевагами установок на основі М-циклу є екологічна безпека, висока економічність, низька питома вартість (конструкція не містить складних вузлів), невеликі експлуатаційні витрати. Оскільки всі процеси відбуваються за атмосферних умов, то не виникає проблеми герметизації установки. Важливим фактором є також відсутність високовартісного компресора і холодильного агента.

#### ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ М-ЦИКЛУ В УКРАЇНІ

Практичне використання М-циклу охоплює багато енергетичних тепло- і масообмінних технологій (рис. 3). Нині серійно випускають і пропонують на міжнародному

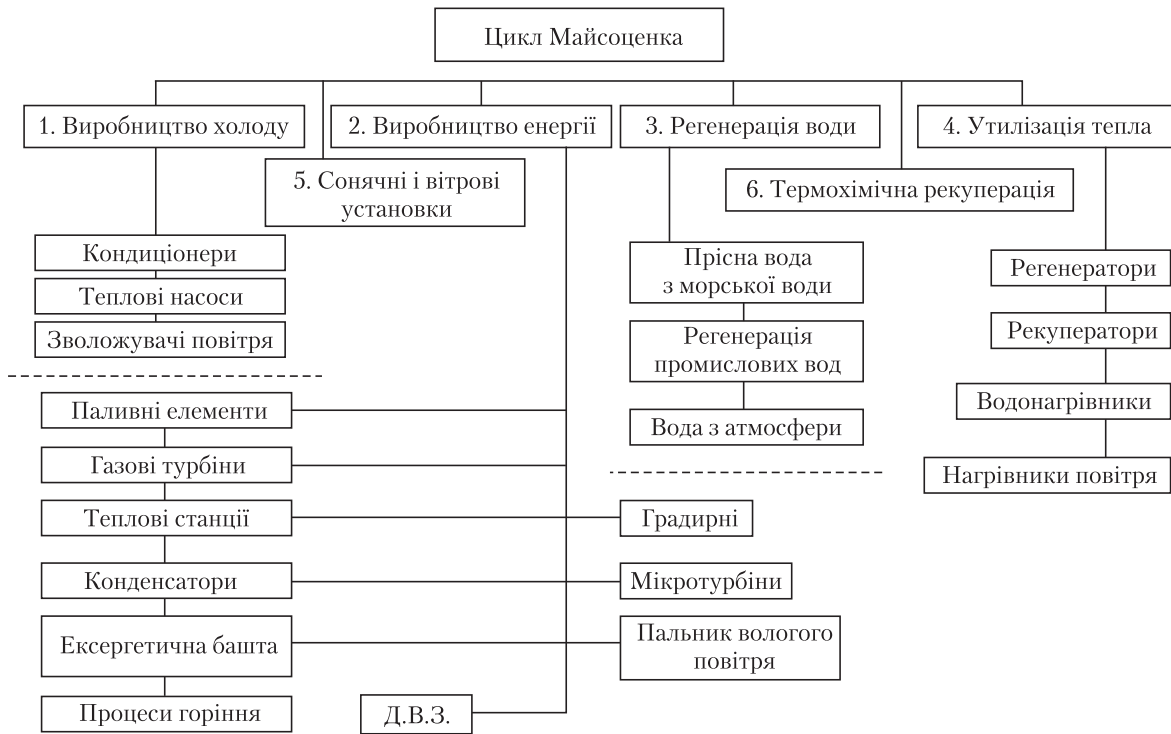


Рис. 3. Галузі використання циклу Майсоценка [5–8]

ринку випарні, сонячні та гібридні кондиціонери, сонячні генератори електроенергії з системою охолодження за М-циклом. На стадії дослідження і пілотного проектування перебувають промислові градирні, зволожувачі повітря, установки для одержання прісної води з промислових рідин і морської води, охолоджувачі повітря на вході в газув турбіну, теплові насоси.

Уперше цикл Майсоценка на практиці було використано компанією «Coolerado Corporation» (Денвер, США) для кондиціонерів нового покоління, які сьогодні випускають у США, Європі, Індії, Китаї, Австралії, Південній Америці, Сінгапурі [5, 6]. Акт Національної лабораторії джерел відновлюваної енергії США (NREL) підтверджує [9], що кондиціонери на основі М-циклу споживають майже в 10 разів менше електричної енергії, ніж традиційні кондиціонери компресійного циклу. Дуже важливо, що вони на 100% використовують чисте повітря навколишнього середовища, тоді як традиційні

кондиціонери на 85% працюють на вже використаному повітрі, що рециркулює в приміщенні. Результати досліджень [2] показали, що максимальна (19,14%) ексергетична ефективність циклу Майсоценка відповідає температурі навколишнього середовища (23,88°C).

Значного поширення в Україні можуть набути сонячні кондиціонери за М-циклом, які використовують сонячні батареї для живлення вентилятора атмосферного повітря. Серійний сонячний кондиціонер «Coolerado Cooler R600» має 4 сонячні батареї електричною потужністю 200 Вт кожна для живлення вентилятора кондиціонера, що охолоджує приміщення площею 225 м<sup>2</sup>. Традиційний компресійний кондиціонер потребує для цього 20–30 батарей, або 4–6 кВт потужності. Охолодження сонячних батарей вихлопним повітрям високої вологості використовують у сонячних кондиціонерах компанії «Coolerado Corporation», внаслідок чого ефективність установки зростає з 12,15 до

30,32%. Великий інтерес для України становлять гібридні кондиціонери Hybrid H80, що поєднують кондиціонер за М-циклом (область високих температур) з традиційним компресійним кондиціонером (область низьких температур). Це дає можливість отримати нижчу температуру охолодження повітря і на 80% знизити енергоспоживання компресійного кондиціонера.

У багатьох енергетичних і технологічних процесах основним обмежувальним чинником є температура води, для охолодження якої широко застосовують градирні. Чим холодніша вода, тим інтенсивніше відведення теплоти в конденсаторі, який є складовою частиною багатьох технічних пристроїв. Недостатньо низький вакуум у конденсаторі електростанції внаслідок неефективного охолодження води в градирні призводить до зниження ККД електростанції і підвищення витрати пального на виробництво енергії. Дослідження, виконані Electric Power Research Institute (США), довели, що 65% градирень в енергетиці Сполучених Штатів працюють в умовах, які не відповідають оптимальним за експлуатаційними та кліматичними параметрами, що коштує американській електроенергетиці понад 100 млн дол. США на рік через втрати потужності або зниження виробництва електроенергії [10].

Сьогодні у світі налічується понад мільйон градирень контактного типу, тільки у США їх встановлено кілька сотень тисяч. Теоретично за температури навколишнього середовища 30°C і відносної вологості повітря 35% температура води в такій градирні може бути знижена на 10°C — від 32 до 22°C. Проте через низку обставин реальний ефект охолодження води не перевищує 6–7°C. Оскільки температура охолодження води обмежується температурою повітря навколишнього середовища за мокрим термометром, то градирні такої конструкції ефективніші в зонах з низькою вологістю повітря (10–20%). Проте ці установки широко використовують в Україні, де в літній період вологість помірна (30–50%).

За температури навколишнього повітря 30°C та його відносної вологості 35% температура води в градирні контактного типу теплової електростанції потужністю 500 МВт, що працює за циклом Ренкіна, може бути знижена на 14°C — від 38 до 24°C [8]. Використання градирні за М-циклом (рис. 4а) потребує незначних змін у конструкції насадки (рис. 4в), але дасть змогу охолоджувати воду від 38 до 13°C. При цьому витрата води через градирню знизиться на 44%, а витрата води на підживлення градирні внаслідок втрат на випаровування — на 20%. Загалом у районах з низькою і помірною вологістю повітря (20–50%) завдяки використанню циклу Майсоценка потрібна витрата води в градирні енергоблока потужністю 500 МВт може бути знижена на 38–50%, і лише за вологості повітря понад 60% її можна порівняти з традиційною градирнею. Зазначимо, що проблема зниження споживання води найближчим часом стане особливо актуальною для теплової й атомної енергетики України, де широко використовують парові турбіни.

Енергоблоки потужністю 300 МВт становлять близько 44% потужності всіх енергоблоків України. Розрахунки свідчать, що додаткове зниження температури охолоджуваної води в градирні за М-циклом може досягати 11°C. Це дозволяє отримати на одному енергоблоці економію понад 400 тис. дол. США завдяки зростанню ККД і супутній економії пального. Потрібна витрата оборотної води при цьому знизиться на 25–30%. У масштабі України використання градирні за М-циклом у складі енергоблоків потужністю 200 і 300 МВт дасть можливість одержати річну економію понад 25 млн дол. США. Якщо ж розглядати збільшення виробництва електричної енергії при збереженні витрати води через градирню (продажна ціна 0,036 дол. США за 1 кВт·год), то зекономити можна вже більш як 500 тис. дол. за рік на один енергоблок.

Великий інтерес становить використання градирні за М-циклом під час роботи енергоблока в маневреному режимі. У цьому разі в

денний час градирня працює для охолодження оборотної води, а в нічний — для вироблення води. Враховуючи незначну вартість модернізації градирні за циклом Майсоценка, повернення інвестицій можна очікувати впродовж двох років.

Використання градирень за М-циклом може принести значні економічні вигоди і в інших галузях економіки України. Зменшення температури води для охолодження промислового компресора на  $1^{\circ}\text{C}$  забезпечує зниження електричної потужності на його привід на 4,5%. Зменшення температури охолоджуваної води у процесі виробництва монофосфату на  $1,7^{\circ}\text{C}$  (від  $25,6$  до  $23,9^{\circ}\text{C}$ ) сприяє підвищенню продуктивності підприємства на 12 т/год, або на 7,7%. Великий хімічний комбінат втрачає понад 25 млн дол. США за рік через зниження продуктивності лише тому, що температура води на виході з градирні на  $3^{\circ}\text{C}$  вища за її проектне значення [10].

Великий інтерес для України становлять установки для виробництва прісної води з морської або засоленої, промислових стоків, а також екстрагування вологи з атмосферного повітря. В опріснювачах на основі М-циклу (рис. 5) підігріте повітря подається в сухий робочий канал апарата Майсоценка, проходить через вологий канал, де досягає насиченого стану з високим рівнем вологості й охолоджується. Насичене повітря частково подається в сухий канал, де відбувається його охолодження (теоретично до точки роси) і конденсація вологи. Розрахунки показують [8], що вартість виробництва 1 т прісної води становить близько 0,25 дол. США, що значно дешевше, ніж у разі використання технології зворотного осмосу. Такі установки можна широко застосовувати в різних галузях промисловості для утилізації низькопотенційної теплової енергії, яка у великій кількості викидається в атмосферу (промислові гази, системи кондиціонування, теплові насоси тощо).

Цікаві для України й водогрійні установки і котли з екологічно чистим паливом, який

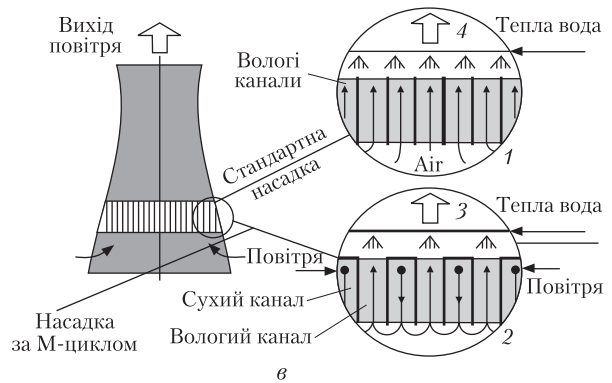
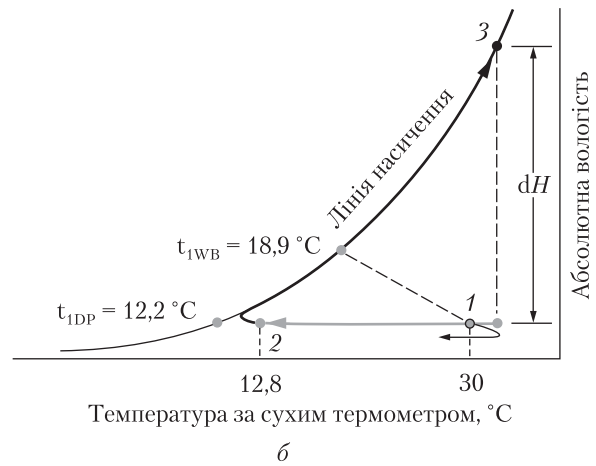
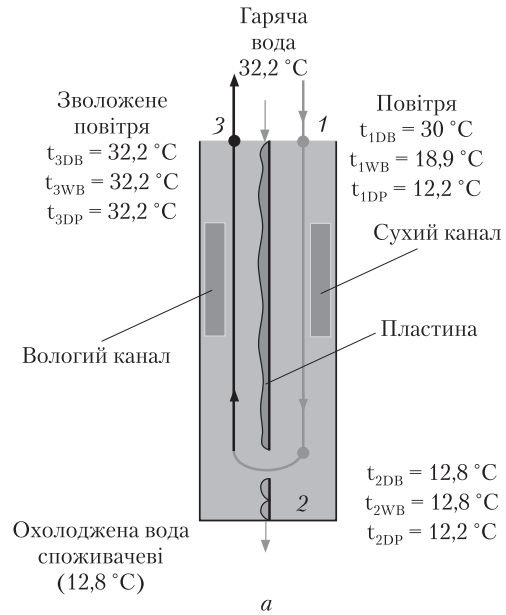
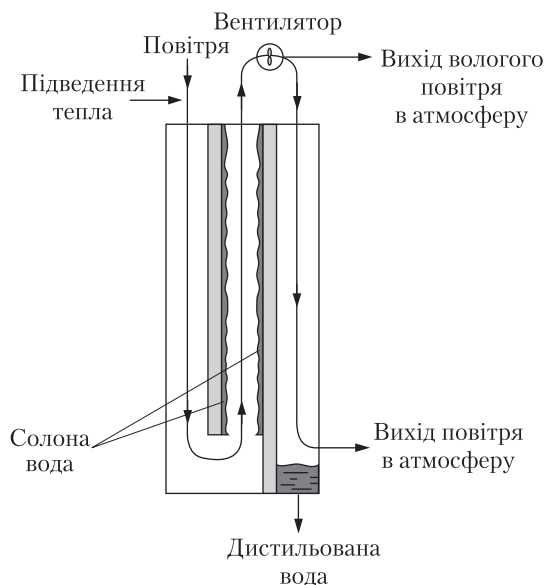
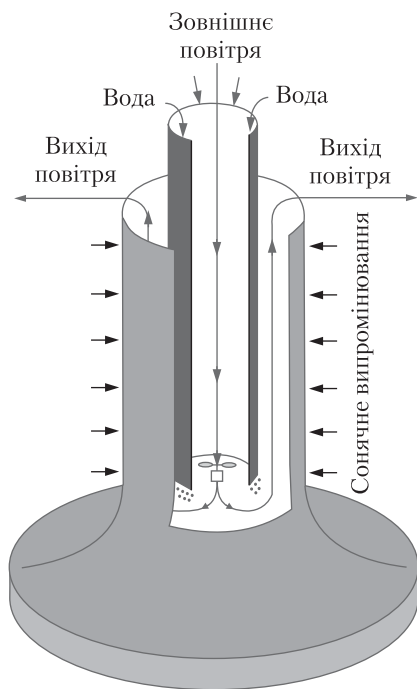


Рис. 4. Цикл Майсоценка в градирні відкритого типу: а — схема течії; б — психрометрична діаграма; в — насадки за традиційним і М-циклом [8]



**Рис. 5.** Схема установки за М-циклом для отримання прісної води з морської і засоленої, а також із промислових стоків [5, 6]



**Рис. 6.** Ексергетична башта за циклом Майсоценка [8]

використовує повітря високої вологості (30% і більше). У цьому разі в тепломасообмінному апараті Майсоценка утилізується теплота і

волога з продуктів згоряння, а відпрацьоване повітря високої вологості використовується в пальнику при спалюванні природного газу.

Пристрої на основі М-циклу можна ефективно застосовувати в теплових насосах. Установлення тепломасообмінного апарата Майсоценка замість традиційного конденсатора дасть змогу збільшити тепловий потік у процесі конденсації. Перспективним може стати використання М-циклу для охолодження потужного електронного устаткування, що характеризується значним тепловиділенням [7].

Інтерес для нетрадиційної енергетики України становить також ексергетична башта Майсоценка [8], яку можна використовувати для вироблення електроенергії, холодного повітря і холодної води. Схему такої башти зображено на рис. 6. Вона складається з двох вертикальних концентричних циліндрів, причому зовнішня частина внутрішнього циліндра покрита капілярно-пористим матеріалом і змочується водою. В центральному каналі башти потік у результаті охолодження рухається згори донизу, а при нагріванні в кільцевому каналі — знизу догори зі збільшенням вологості.

Велика психрометрична різниця температур як рушійна сила тепло- і масообміну принципово відрізняє ексергетичну башту Майсоценка від «сухих» енергетичних башт значної висоти. За відповідної висоти башти й достатньо великої швидкості потоку можливо встановити в її нижній частині вітрову установку, що дає змогу виробляти електричну енергію. Така установка працює цілодобово незалежно від швидкості вітру в навколишній атмосфері. Як показують розрахунки, ексергетична башта заввишки 10 м здатна виробляти до 25 кВт·год електроенергії щодоби. Фактично будь-яку індустріальну трубу, забезпечену пристроєм на основі М-циклу, можна використати для вироблення електроенергії, холодного повітря (якщо відбирати частину повітря в нижній частині градирні) й охолодженої води.

М-ЦИКЛ  
У ГАЗОТУРБОБУДУВАННІ УКРАЇНИ

Цикли газових турбін зі зволоженням повітря («STIG», «НАТ», «СНАТ» та ін.) мають техніко-економічні показники вищі, ніж установки простого циклу, але характеризуються складною виробничою інфраструктурою. Зокрема, вони складаються з двох металомістких апаратів (нагрівник повітря і зволожувач), чотирьох великогабаритних теплообмінників і значної кількості додаткового устаткування, що знижує надійність установки і підвищує її вартість та ціну виробленої електроенергії. Через це вони поки що не набули значного поширення. Вологість повітря, що подається в камеру згоряння в циклах «STIG», «НАТ», «СНАТ», менша ніж 20%.

Вбачається, що цикл Майсоценка можна ефективно використовувати в газових турбінах зі зволоженням повітря. Він дозволяє досягти вищої вологості повітря (30% і більше) в одному тепломасообмінному апараті, який компактніший, дешевший і технологічніший у виготовленні. Україна має великий досвід проектування і створення парогазових установок середнього класу за циклом «STIG» з уприскуванням пари в камеру згоряння й проточну частину турбіни, газопарової ГТУ «Водолій-16К» [11] і може посісти провідне місце на світовому ринку газових турбін, поклавши М-цикл в основу розроблення енергетичних і привідних газових турбін наступного покоління.

У роботі [8] розглянуто одну з можливих схем газотурбінної установки на основі М-циклу (рис. 7). Застосування двох апаратів непрямого випарного охолодження (на вході й виході з ГТУ) дає змогу вирішити кілька важливих завдань:

1) знизити «нижню» температуру циклу до температури, близької до точки роси, і тим самим підвищити ККД установки без збільшення температури газу перед турбіною. З термодинаміки відомо, що кожний градус зменшення «нижньої» температури циклу ефективніше впливає на ККД газової турбіни, ніж збільшення «верхньої» темпе-

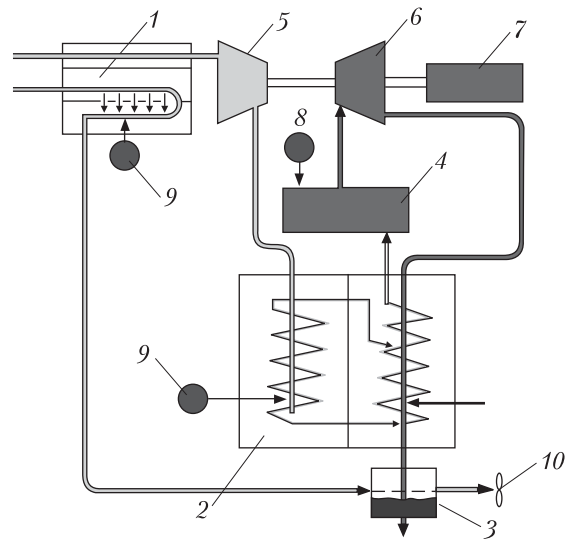


Рис. 7. Газотурбінна установка з охолодженням повітря на вході в компресор, зволоженням повітря на вході в камеру згоряння й утилізацією теплоти і вологи рухомих газів [8]: 1, 2 – тепломасообмінний апарат Майсоценка; 3 – конденсатор води; 4 – камера згоряння; 5 – компресор; 6 – турбіна; 7 – електрогенератор; 8 – подавання пального; 9 – подавання води; 10 – вентилятор

ратури. Одночасно утилізується «викинута» теплота, водяна пара, що підводиться в циклі, і вода з продуктів згоряння;

2) досягти високого ступеня зволоження стиснутого повітря (30% і більше) на вході в камеру згоряння. У разі використання пари високої вологості поліпшуються процеси згоряння пального, в кілька разів знижується рівень шкідливих викидів в атмосферу [12], збільшується потужність газотурбінної установки;

3) знизити температуру повітря перед компресором установки в спекотну пору року, що підвищує її економічність. Це досягається без зволоження повітря, характерного для більшості відомих технологій охолодження вхідного повітря. За температури навколишнього середовища понад 15°C зменшення температури вхідного повітря лише на 1°C веде до збільшення ККД газотурбінної установки на 0,5–0,7%. Чим холодніше вхідне повітря, тим воно щільніше, що визначає вищу витрату повітря і ступінь



стискання в компресорі. Зниження температури повітря на вході в компресор може також бути ефективним засобом зміни потужності ГТУ в період пікових і напівпікових навантажень.

Цикл Майсоценка можна використовувати як у мікротурбінах, так і в газових турбінах великої потужності. При цьому високе значення ККД газотурбінної установки зберігається навіть у разі зниження навантаження турбіни до 50%, тобто для компенсації пікових і напівпікових навантажень. Важливою перевагою М-циклу порівняно з парогазовим циклом є той факт, що високе значення ККД (на рівні 50–55%) досягається без використання парової турбіни, конденсатора та інших металомістких пристроїв, які пов'язані з практичною реалізацією парогазового циклу.

Термічний ККД циклу ГТУ при її модифікації й однаковому тепловиділенні в базовій (цикл Брайтона) і модифікованій (цикл Майсоценка) установках визначається рівнянням [8]

$$\eta_M = 1 - [(t_{out,M} - t_{amb}) / (t_{out,B} - t_{amb})] \times (1 - \eta_B)(m_2/m_1),$$

де  $t_{out,M}$ ,  $t_{out,B}$  – вихідна температура за циклами Майсоценка і Брайтона;  $t_{amb}$  – температура навколишнього середовища;  $\eta_B$  – дійсний термічний ККД циклу Брайтона;  $m_2$ ,  $m_1$  – витрата робочого тіла через газову турбіну за циклами Майсоценка і Брайтона.

Як приклад розглянемо енергетичну газову турбіну UGT-25 потужністю 25 МВт виробництва ДП НВКГ «Зоря» – «Машпроект». Температура продуктів згоряння на вході – 1350°C, на виході – 465°C, теоретичний ККД циклу Брайтона – 0,48, дійсний ККД – 0,37, ККД циклу Карно – 0,815. Встановлення на виході з газотурбінної установки тепломагнітного апарату Майсоценка приводить до того, що відношення  $m_2/m_1$  перебуває в межах 1,1–1,2 [4], тому для подальших розрахунків приймаємо  $m_2/m_1 = 1,2$ . Тоді за наведеним вище рівнянням для  $t_{amb} = 27^\circ\text{C}$  дістанемо  $\eta_M = 1 - 1,92 \cdot 10^{-3}(t_{out,M} - 27)$ .

У М-циклі внаслідок високої вологості потоку в газовій турбіні температура конденсації на виході з турбіни (точка роси) становить 80–120°C. Її можна прийняти як температуру  $t_{out,M}$ , що є значно вищою за температуру точки роси навколишнього середовища (10–15°C). Тоді для середнього значення  $t_{out,M} = 100^\circ\text{C}$  і  $t_{out,M} - t_{amb} = 73^\circ\text{C}$  отримаємо  $\eta_M \approx 86\%$ , тобто близько 86% хімічної енергії пального може бути ефективно використано в газотурбінній установці на основі М-циклу. Це значно більше, ніж в ідеальному циклі Брайтона і навіть більше, ніж у циклі Карно.

Більш ідеальний термічний ККД М-циклу порівняно з циклом Карно зумовлений принциповою відмінністю між ними як граничними термодинамічними циклами. У циклі Карно використовується одне робоче тіло, яке послідовно зазнає стискання, підведення теплоти (горіння), розширення й охолодження до температури навколишнього середовища. Цикл Майсоценка використовує два різних робочих тіла – повітря в компресорі й вологі продукти згоряння в газовій турбіні з різними витратами, причому кожне з них працює в оптимальних умовах. Граничною температурою в М-циклі є температура точки роси, яка нижча, ніж температура навколишнього середовища.

Використання двох різних робочих тіл має й інші переваги. Оскільки після компресора в стиснуте повітря додається волога, то для збереження витрати повітря, що відповідає базовій турбіні, необхідно стискати меншу масову витрату повітря, тобто компресор може бути меншої потужності. За заданої масової витрати суміш продуктів згоряння і вологи має меншу густину, ніж продукти згоряння, крім того, завдяки наявності водяної пари вона характеризується більшою мірою розширення. Оскільки об'ємна витрата робочого тіла через газову турбіну зростає, то її потужність також збільшується.

У 2005 р. в США було проведено випробування мікротурбінної установки Capstone C30 потужністю 30 кВт (Department of

Water and Power of the City Los Angeles Distribution Power Unit спільно з «Coolerado Corporation»). Експерименти показали, що в разі використання вхідного охолоджувача на основі М-циклу зниження температури повітря становило  $8^{\circ}\text{C}$  — від  $32$  до  $24^{\circ}\text{C}$ . У режимі максимальної потужності збільшення потужності становило  $8,8\%$ , а в режимі максимального ККД —  $11,7\%$ . Що стосується ККД мікротурбінної установки, то в першому випадку він зріс на  $3,4\%$ , а в другому — на  $0,2\%$ .

Для масштабного відпрацювання ГТУ на основі М-циклу можна застосувати установку «Водолій-16К», яка діє в газотранспортній системі України і має для цього всю необхідну інфраструктуру. Якщо її модернізувати за схемою, наведеною на рис. 5, можливо використати два апарати непрямого випарного охолодження — на вході в компресор і на виході з газової турбіни.

Одним із найперспективніших і наймасштабніших додаткових застосувань М-циклу може стати охолодження компримованого (стисненого) природного газу на компресорних станціях, яких на території України більш як 80. Вирішення цієї проблеми, що до цього часу ґрунтується на використанні неефективних, громіздких і енерговитратних апаратів повітряного охолодження (АПО), дасть змогу досягти значного економічного ефекту в масштабі України. Для прикладу зазначимо, що одна вітчизняна компресорна станція використовує в середньому  $300\text{ кВт}$  встановленої електричної потужності, переважно на привід вентиляторів АПО, що охолоджують в теплообмінних апаратах компримований газ до  $45^{\circ}\text{C}$ . Вартість одного АПО становить понад  $35$  млн дол. США, причому в середньому на одній компресорній станції встановлено  $12$ – $14$  таких апаратів. Упродовж року (робота  $6000$  год/рік) тільки на оплату електроенергії для їх роботи на одній компресорній станції витрачається понад  $250$  млн дол. США. З попередніх розрахунків видно, що вирішення цієї проблеми за допомогою апаратів охолодження за циклом Майсоценка економічно

доцільне і дозволяє повернути інвестиції протягом  $1$ – $2$  років.

#### НАУКОВІ ПРОГРАМИ

Нині теоретичні і прикладні дослідження циклу Майсоценка проводять у країнах Європи, Азії, Австралії, Африки, Південної й Північної Америки. У США інтенсивні науково-дослідні, конструкторські й прикладні роботи виконують у чикагському Інституті газових технологій (Gas Technology Institute, GTI) і компаніях «Idalex Corporation», «Coolerado Corporation» (Денвер) у співпраці з провідними університетами, науково-дослідними і промисловими організаціями різних країн.

Промислове використання циклу Майсоценка в Україні потребуватиме наукових досліджень у галузі теплофізики, горіння пального, матеріалознавства, теорії газових турбін та інших наук, які можуть бути виконані в установах НАН України. Знадобиться також подальший науковий супровід академічними інститутами розроблення нових установок у співробітництві з вітчизняними бізнес-структурами. Провідною конструкторською організацією з проектування в галузі газотурбобудування може стати ДП НВКГ «Зоря» — «Машпроект» (Миколаїв).

У  $2011$  р. підписано Угоду про науково-технічну співпрацю між Відділенням фізико-технічних проблем енергетики (ВФТПЕ) НАН України, компанією «Idalex Corporation» (США) та Інститутом газових технологій (США), у програму якої увійшли питання дослідження і практичного застосування М-циклу в Україні. Інститути ВФТПЕ НАН України залучатимуть до використання М-циклу в градирнях нового покоління для охолодження компримованого природного газу на ГТС України, в енергетичних і привідних газотурбінних установках, для опріснення води та утилізації вторинних енергоресурсів, у пальниках, що використовують повітря високої вологості, та ін.

## ВИСНОВКИ

Цикл Майсоценка відкриває широкі можливості для вдосконалення багатьох енергетичних і тепломасообмінних процесів. Його реалізація потребує відносно простого устаткування. В Україні М-цикл може знайти широке використання в системах кондиціонування, промислових градирнях, конденсаторах, теплових насосах, сонячних і вітроустановках, установках опріснення і очищення води, газових турбінах, системах охолодження електроніки. Пристрої на основі М-циклу мають вищі техніко-економічні показники і чинять менший шкідливий вплив на навколишнє середовище.

Великі перспективи має використання М-циклу для модернізації вітчизняної теплової енергетики, зокрема в градирнях. Додаткове зниження температури охолоджуваної води лише на 1°C у градирні за М-циклом дозволить за річної роботи енергоблока потужністю 300 МВт отримати значну економію завдяки підвищенню ККД станції і зниженню витрати пального. Суттєвій економії в роботі енергоблока сприяє скорочення витрати води в результаті збільшення глибини її охолодження в градирні.

Застосування М-циклу в газотурбобудуванні дає можливість зменшити «нижню» температуру термодинамічного циклу і підвищити його ККД без збільшення температури на вході в турбіну, істотно знизити викиди діоксиду азоту в атмосферу, зменшити роботу, що витрачається на привід компресора, підвищити потужність газової турбіни. Як пілотні проекти для оцінювання переваг і техніко-економічних показників ГТУ з М-циклом на першому етапі можливо використати мікротурбінні установки, на другому — установку «Водолій-16К», яка з 1993 р. експлуатується в ГТС України. Провідною організацією з таких проектів може стати підприємство ДП НВКГ «Зоря» — «Машпроект», а науковий супровід здатні забезпечити інститути НАН України.

Загалом широке використання М-циклу в різних галузях промисловості України у найближчій перспективі може створити передумови для формування нової стратегії енергозаощадження в Україні.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Wani C., Ghodke S., Shrivastava C. A review on potential of Maisotsenko cycle in energy saving applications using evaporative cooling // Int. J. Adv. Res. Sci. Eng. Technol. — 2012. — V. 1, N 1. — P. 15–20.
2. Galiskan H., Hepbasli A., Dincer I., Maisotsenko V. Thermodynamic performance assessment of a novel air cooling cycle: Maisotsenko cycle // Int. J. Refrig. — 2011. — V. 34, N 4. — P. 980–990.
4. Gillan L., Maisotsenko V. Maisotsenko open cycle used for gas turbine power generation // Proc. ASME Turbo Expo 2003 (June 16–19, 2003, Atlanta, USA). — P. 75–84.
5. Gillan L. Maisotsenko cycle for cooling processes // Int. J. Energy Clean Env. — 2008. — V. 9, N 1–3. — P. 47–64.
6. The Maisotsenko cycle — Conceptual // <http://www.idalex.com/>.
7. The Maisotsenko cycle — Basic // <http://www.idalex.com/>.
8. Maisotsenko V., Reizin I. The Maisotsenko cycle for electronics cooling // Proc. ASME InterPACK2005 (July 17–22, 2005, San-Francisco, USA). — P. 1–10.
9. Maisotsenko V., Gillan L., Kozlov A. The Maisotsenko cycle for power generation, waste energy recovery, and water reclamation // Proc. Clean Energy Supercluster Forum (October 25, 2010, Fort Collins, USA) — 41 p.
10. National Renewable Energy Laboratory // <http://www.nrel.gov>.
11. Burger R. Profits and cold water // Engineered Systems Magazine. — 2000. — V. 17, N 9. — P. 86.
12. Product Catalog «Zorya» — «Mashproekt» (Ukraine). — 2009. — 55 p.
13. Soroka B.S. Method for accounting for the effect of composition and parameters of the mixture on the formation of nitrogen oxides in combustion processes // J. Ecol. Technol. Res. — 1993. — V. 6. — P. 47–53.

Стаття надійшла 24.10.2012 р.

А.А. Халатов<sup>1</sup>, И.Н. Карп<sup>2</sup>, Б.В. Исаков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт технической теплофизики  
Национальной академии наук Украины  
ул. Желябова, 2а, Киев, 03057, Украина

<sup>2</sup> Институт газа

Национальной академии наук Украины  
ул. Дегтярёвская, 39, Киев, 03113, Украина

<sup>3</sup> Государственное предприятие

«Научно-производственный комплекс  
газотурбостроения «Зоря» – «Машпроект»  
просп. Октябрьский, 42а, Николаев, 54018, Украина

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ МАЙСОЦЕНКО  
И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ  
В УКРАИНЕ

В статье представлен обзор работ в области нового термодинамического цикла Майсоценко и его возможного использования на различных объектах промышленности Украины. Среди них — энергетические газовые турбины, кондиционеры и охладители воздуха, опреснители морской воды, горелки с высоким содержанием влаги в воздухе и некоторые другие. Показано, что устройства на основе цикла Майсоценко обладают высокими технико-экономическими показателями, которые превышают характеристики других современных установок.

*Ключевые слова:* косвенно-испарительное охлаждение, мокрый термометр, точка росы, психрометрическая диаграмма, газовые турбины.

A.A. Khalatov<sup>1</sup>, I.N. Karp<sup>2</sup>, B.V. Isakov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Engineering Thermophysics  
of National Academy of Sciences of Ukraine  
2a Zhelyabova St., Kyiv, 03057, Ukraine

<sup>2</sup>Gas Institute

of National Academy of Sciences of Ukraine  
39 Degtyarivska St., Kyiv, 03113, Ukraine

<sup>3</sup>State Enterprise

Scientific Production Complex  
of Gas Turbines «Zoria» – «Mashproekt»  
42a Oktyabrsky Prosp., Nikolaev, 54018, Ukraine

MAISOTSENKO THERMODYNAMIC CYCLE  
AND PROSPECTS OF ITS APPLICATION  
IN UKRAINE

The review is given in the field of a novel Maisotsenko thermodynamic cycle and its application in various industrial objects of Ukraine. Among those are power gas turbines, conditioners and air coolers, sea water distillators, burners with a high level of moisture in air and some others. It is shown that devices on the Maisotsenko cycle demonstrate high technical and economic parameters which exceed characteristics of other modern devices.

*Keywords:* indirect-evaporating cooling, wet bulb thermometer, dew point temperature, psychrometric chart, gas turbines.