

АНАЛІЗ ОБЕРНЕНОГО ТЕРМОДИНАМІЧНОГО ЦИКЛА ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ ІЗ РЕГЕНЕРАЦІЄЮ ТЕПЛОТИ ЗА М-ЦИКЛОМ

Ю. П. Кочура^{1, а}, А. А. Халатов^{1,2}

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

²Інститут технічної теплофізики НАН України

Анотація

Розглянуто схему та виконано термодинамічний аналіз газотурбінної установки (ГТУ), яка працює за оберненим циклом Брайтона із тепломасообмінним апаратом Майсоценка. Таке поєднання оберненого циклу Брайтона та циклу Майсоценка (М-цикла) дає змогу істотно покращити техніко-економічні характеристики ГТУ за рахунок зменшення «нижньої» температури циклу до температури, яка менша точки роси і тим самим підвищити ККД установки без збільшення температури робочого газу перед турбіною. Використання апарату Майсоценка дозволяє зменшити у декілька разів температуру робочого тіла перед компресором порівняно з температурою паро-повітряної суміші на виході з турбіни, а також конденсувати вологу у каналах М-циклу, що призводить до збільшення густини сухого повітря на вході у компресор й зменшення енергозатрат на його привід.

Ключові слова: обернений цикл Брайтона, регенерація теплоти, цикл Майсоценка.

Вступ

Більшість сучасних газотурбінних двигунів та промислових ГТУ працюють за прямим термодинамічним циклом Брайтона. Проте, основним недоліком таких установок є значна кількість енергії, яка викидається в атмосферу без подальшого її використання. Термічний ККД кращих на сьогодні газотурбінних установок не перевищує 40%. Пошук можливих шляхів підвищення термодинамічної ефективності циклу привів до ідеї оберненого циклу Брайтона. Однак, така конфігурація оберненого циклу не отримала широкого практичного використання із-за різкого збільшення об'єму компресора і великих витрат енергії на його привід. Ця проблема може бути вирішена завдяки комбінації оберненого циклу Брайтона із М-циклом, що відкриває принципову можливість у створенні газотурбінних установок з високими значеннями термічного ККД, який значно перевищує термічний ККД прямого циклу Брайтона.

Одним із потенційних невичерпних джерел енергії, наявних практично в будь-якій точці світу, є природна нерівновага атмосферного повітря, що проявляється у формі психрометричної різниці температур. До того як стали відомими дослідження американського вченого, колишнього нашого співвітчизника професора В. Майсоценка, цю різницю, зважаючи на її незначну величину, практично не використовували. Майсоценко першим показав, як можна застосувати її на практиці і створити нові енергоощадні технології й устаткування. Ґрунтуючись на теоретичних положеннях термодинаміки вологих потоків, Майсоценко запропонував новий термодинамічний цикл,

відомий як цикл Майсоценка (Maisotsenko Cycle), або М-цикл (M-Cycle), і запатентував його в різних країнах [1].

Оскільки, в пристроях на основі М-циклу, використовується потенціальна енергія навколишнього середовища, що проявляється у вигляді психрометричної різниці температур, 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 установок. Важливим фактором є також відсутність високовартісного компресора і холодильного агента. Практичне використання М-циклу охоплює багато енергетичних та тепломасообмінних технологій [1]. Нині серійно випускають і пропонують на міжнародному ринку випарні, сонячні та гібридні кондиціонери, сонячні генератори електроенергії із системою охолодження за М-циклом. На стадії дослідження і проектування перебувають промислові градири, зволожувачі повітря, установки для одержання прісної води з промислових рідин і морської води, охолоджувачі робочого тіла у ГТУ.

Мета роботи – дослідження оберненого термодинамічного циклу ГТУ із регенерацією теплоти за М-циклом.

^аE-mail: iuriy.kochura@gmail.com

1. Схема ГТУ із тепломасообмінним апаратом Майсоценка

На рис. 1 подана схема газотурбінної установки, що працює за оберненим циклом Брайтона із тепломасообмінним апаратом Майсоценка [2], а на рис. 2 відповідна $h-s$ діаграма. Тут h та s – питомі значення ентальпії та ентропії робочого тіла відповідно. Схема включає таку послідовність термодинамічних процесів: спочатку відбувається підігрів повітря, яке надходить із атмосфери у сонячний нагрівник – ділянка 1 – 2; після сонячного нагрівника, підігріте повітря потрапляє в апарат Майсоценка, де у сухих каналах, на ділянці 2 – 2', зазнає охолодження до температури точки роси; потім, насичене повітря потрапляє у вологі канали апарата Майсоценка, де на ділянці 2' – 3 відбувається збільшення його ентальпії; після апарата Майсоценка, високоентальпійна паро-повітряна суміш, надходить до камери згорання й зазнає додаткового підігріву – ділянка 3 – 4; підігріта суміш із камери згорання, подається на турбіну, розширюючись та виконуючи при цьому роботу – ділянка 4 – 5; розширене у турбіні робоче тіло, яке володіє ще значним невикористаним енергетичним потенціалом, потрапляє у канали конденсації апарата Майсоценка, охолоджуючись до насиченого стану – ділянка 5 – 6; насичена паро-повітряна суміш, продовжуючи рух у каналах конденсації апарата Майсоценка, на ділянці 6 – 7, зазнає подальшого охолодження до повної конденсації вологості; на виході з апарату М-циклу, внаслідок досить низької температури, потік буде двофазний, включаючи повітря і дрібні частки твердої фази, які відловлюються спеціальним пристроєм, а сухе повітря потрапляє у низькотемпературний теплообмінник, де здійснюється додаткове відведення теплоти – ділянка 7 – 8; після низькотемпературного теплообмінника, сухе повітря потрапляє у компресор, стискаючись до тиску, який близький атмосферному – ділянка 8 – 9.

Особливості циклу ГТУ:

- 1) У циклі використовується два робочих тіла – насичена високоентальпійна паро-повітряна суміш у турбіні і сухе холодне повітря у компресорі. Оскільки, потік перед компресором сухий – це різко зменшує витрати енергії на роботу компресора.
- 2) За рахунок високого ступеня зволоження повітря в апараті Майсоценка (до $0,5 \text{ кг пари на } 1 \text{ кг сухого повітря}$) його ентальпія при температурі $300 - 400^\circ\text{C}$, еквівалентна ентальпії продуктів згорання газу при температурі $1300 - 1400^\circ\text{C}$. Значне зростання ентальпії потоку відбувається, головним чином за рахунок використання енергії довілля – психрометричної різниці температур.
- 3) Теплота, що виділилася при конденсації, практично повністю передається у вологі канали апарата Майсоценка, де використовується для випаровування води і тим самим збільшуючи вологовміст повітря, яке надходить у ці канали.

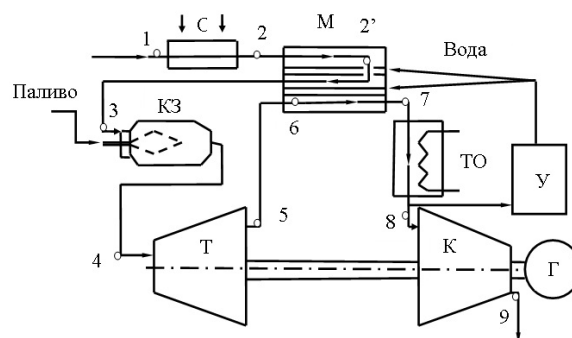


Рис. 1. Газотурбінна установка оберненого цикла Брайтона із тепломасообмінним апаратом Майсоценка [2]: С – сонячний нагрівник, М – апарат Майсоценка, КЗ – камера згорання, Т – турбіна, ТО – низькотемпературний теплообмінник, У – уловлювач льоду, К – компресор, Г – електрогенератор

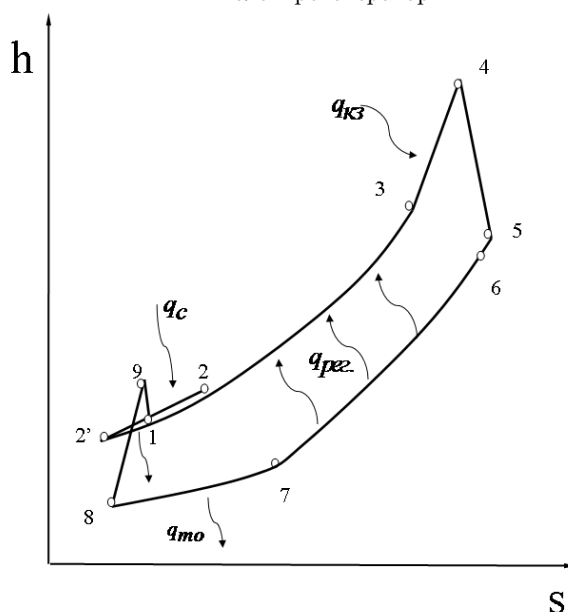


Рис. 2. $h-s$ Діаграма ГТУ оберненого цикла Брайтона із тепломасообмінним апаратом Майсоценка

- 4) Внаслідок використання психрометричної енергії і високої міри регенерації М-циклу, термічний ККД ГТУ може досягати 70 % і більше [2].

2. Основні наближення математичної моделі, яка використовується для розрахунку техніко-економічних параметрів циклу ГТУ

У процесі розробки метода розрахунку техніко-економічних параметрів циклу ГТУ із тепломасообмінним апаратом Майсоценка, використовувалися такі наближення:

- паро-повітряна суміш підкоряється закону ідеального газу;
- ентальпія потоку розраховується від абсолютного нуля;
- термодинамічні процеси циклу вважаємо адіабатними та політропними;

- питома теплоємність сухого повітря і водяних парів, а також прихована теплота випаровування води є постійними величинами, які не залежать від температури та тиску;
- процеси теплообміну у каналах апарата Майсоценка адіабатні.

Кількість пару, що утворюється у процесі згорання нестехіометричної паливно-повітряної суміші в камері згорання, складає не більше 2 – 3% від вологовмісту повітря на вході у камеру згорання. Тому, можна вважати, що у камері згорання не відбувається додаткового зволоження паро-повітряної суміші за рахунок згорання палива. При адіабатичному розрахунку, коефіцієнт збереження загального тиску у всіх елементах газотурбінної установки, а також ККД компресора та турбіни вважаємо рівними 1.

3. Вихідні дані для розрахунку

Усі дані, які використовуються для розрахунку техніко-економічних параметрів ГТУ із тепломасообмінним апаратом Майсоценка, наводяться нижче у міжнародній системі одиниць СІ:

- газова постійна сухого повітря:
 $R_{air} = 287 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К};$
- газова постійна водяного пара:
 $R_{steam} = 461.5 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К};$
- питома ізобарна теплоємність водяного пара:
 $C_{p,st} = 1875.69 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К};$
- питома теплота випаровування водяного пара:
 $r_{st} = 2501 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К};$
- атмосферний тиск: $P_a = 101.325 \text{ кПа};$
- температура повітря на вході у сонячний нагрівач: $T_1 = 20^\circ\text{C}$ (варіюється);
- відносна вологість атмосферного повітря:
 $\varphi = 20\%$ (варіюється);
- вологовміст атмосферного повітря d_1 визначається за психрометричною діаграмою (варіюється);
- температура на виході із сонячного нагрівача: $T_2 = 40 \dots 90^\circ\text{C}$ (варіюється);
- температура паро-повітряної суміші перед турбіною: $T_4 = 140 \dots 340^\circ\text{C}$ (варіюється).

4. Техніко-економічні показники ГТУ

Величина питомої теплоти, яка підводиться до робочого газу у циклі:

$$q_1 = q_{1-2} + q_{2'-3} + q_{3-4}$$

Величина питомої теплоти, яка відводиться від робочого газу у циклі:

$$q_2 = q_{2-2'} + q_{5-6} + q_{6-7} + q_{7-8}$$

Питома теплота регенерації М-цикла визначається за формулою:

$$q_{reg} = q_{2-3}$$

де q_{2-3} – зміна питомої ентальпії у апараті М-цикла. Значення термічного ККД циклу ГТУ із регенерацією теплоти визначається за формулою:

$$\eta_{tp} = \frac{q_1 - q_2}{q_1 - q_{reg}}$$

Значення електричного ККД циклу ГТУ визначається за формулою:

$$\eta_{el} = \frac{l_t - l_k}{q_1 - q_{reg}}$$

де l_t – питома робота турбіни; l_k – питома робота компресора.

Ступінь регенерації теплоти у апараті М-цикла визначається за формулою:

$$\sigma = \frac{q_{reg}}{q_2}$$

5. Результати розрахунку

Як видно із рис. 3, термічний ККД η_{tp} при зміні температури T_4 у діапазоні від 160°C до 340°C , змінюється від 45% до 58% при фіксованій температурі $T_2 = 40^\circ\text{C}$. Висока міра регенерації М-циклу 95% (рис. 4) при $T_2 = 90^\circ\text{C}$, сприяє збільшенню термічного ККД η_{tp} від 76% до 83% при зміні температури робочого тіла перед турбіною T_4 у діапазоні від 200°C до 340°C , а електричний ККД при цьому зростає від 67% до 79%. Різке зростання міри регенерації енергії у апараті М-циклу із збільшенням температури повітря за сонячним нагрівачем T_2 , зумовлено інтенсивними процесами конденсації та теплообміну у каналах апарата Майсоценка, які досягаються за рахунок розділення головного потоку на окремі частини, а також за рахунок збільшення різниці температур робочого тіла у вологих та сухих каналах апарату, що за законом Ньютона призводить до зростання теплообміну, а отже і зростання міри регенерації.

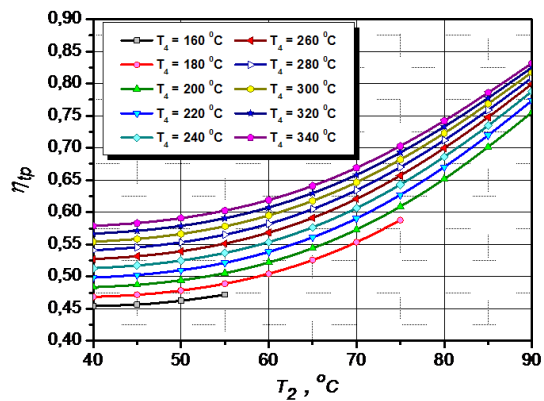


Рис. 3. Залежність термічного ККД ГТУ із регенерацією теплоти від температури повітря на виході із сонячного нагрівача T_2 та температури паро-повітряної суміші перед турбіною T_4

Із наведеної на рис. 5 $T - \Delta s$ діаграми видно, що для даного розрахунку, температура сухого повітря на вході у компресор, точка 8, складає -75°C . Таке зниження температури робочого газу у апараті Майсоценка за рахунок конденсації вологи та використання низькотемпературного теплообмінника, дозволяє отримувати сухе повітря високої густини на вході у компресор, порівняно із густиною робочого тіла на виході із турбіни. Це у свою чергу, призводить

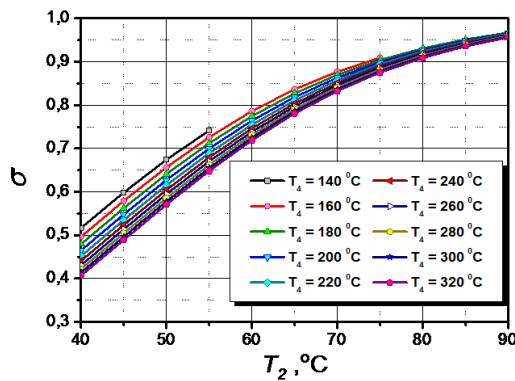


Рис. 4. Залежність ступеня регенерації теплоти у апараті Майсоценка σ від температури повітря на виході із сонячного нагрівача T_2 та температури паро-повітряної суміші перед турбіною T_4 для ГТУ потужністю 10 кВт.

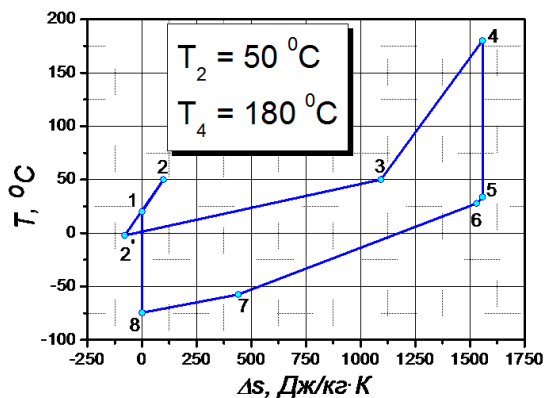


Рис. 5. $T - \Delta s$ діаграма ГТУ оберненого цикла Брайтона із тепломасообмінним апаратом Майсоценка

до зменшення енергозатрат на привід компресора та відкриває принципову можливість широкого застосування оберненого цикла Брайтона у газотурбобудуванні із високими значеннями термічного та електричного ККД.

Висновки

Проведено аналіз оберненого термодинамічного циклу Брайтона ГТУ із регенерацією теплоти, яка здійснюється за М-циклом. На основі цього аналізу було показано, як можна досягти високих значень термічного та електричного ККД, які значно перевищують техніко-економічні характеристики кращих на сьогодні газотурбінних установок, що працюють за прямим циклом Брайтона. Таке поєднання оберненого циклу Брайтона та М-цикла призводить до зменшення енергозатрат на привід компресора, досягається висока міра регенерації, що відкриває принципову можливість широкого застосування оберненого циклу Брайтона у газотурбобудуванні із високими значеннями термічного та електричного ККД.

За результатами проведених розрахунків було отримано залежність термічного ККД η_{tp} ГТУ із регенерацією теплоти від температури повітря на виході із сонячного нагрівача T_2 та температури паро-повітряної суміші перед турбіною T_4 . Показано, що високе значення ККД η_{tp} досягається за рахунок високого значення регенерації М-цикла, що зумовлено інтенсивними процесами конденсації вологи у каналах апарата Майсоценка.

Подальший аналіз принципів роботи ГТУ буде проводитися для визначення впливу вологості атмосферного повітря на техніко-економічні характеристики установки, електричною потужністю 10 кВт.

Перелік використаних джерел

1. Термодинамічний цикл Майсоценка і перспективи його застосування в Україні / А. А. Халатов, І. М. Карп, Б. В. Ісаков — Вісник Національної академії наук України, 2013. — с. 38–49.
2. Субатмосферний обратный цикл Брайтона с регенерацией теплоты по циклу Майсоценка / А. А. Халатов, С. Д. Северин, П. И. Бродецкий, В. С. Майсоценко — Доповіді Національної академії наук України, 2015. — с. 72–79.