

ГТУ НА ОСНОВІ ОБЕРНЕНОГО ЦИКЛУ БРАЙТОНА-МАЙСОЦЕНКА: ВПЛИВ ВОЛОГОСТІ ТА ТЕМПЕРАТУРИ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

Ю. П. Кочура^{1, а}, А. А. Халатов^{1,2}, С. Д. Сєверін²

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

²Інститут технічної теплофізики НАН України

Анотація

В даній роботі розглянуто вплив вологості та температури атмосферного повітря на техніко-економічні характеристики оберненого циклу Брайтона-Майсоценка. Визначено найбільш сприятливу для роботи ГТУ температуру паро-повітряної суміші перед турбіною. Цей висновок зроблено на основі аналізу енергозатрат сучасних компресорів та побудованої залежності, яка встановлює зв'язок між характерним значенням ККД циклу та ступенем стиснення повітря у компресорі. Показано, що збільшення вологості атмосферного повітря призводить до зменшення ступеня регенерації теплоти апаратом Майсоценка, а на ККД вологість взагалі не впливає. Натомість, збільшення температури оточуючого середовища призводить до зменшення ККД циклу та збільшення ступеня регенерації теплоти апаратом Майсоценка.

Ключові слова: політронний процес, обернений цикл Брайтона, цикл Майсоценка.

Вступ

Дана стаття є продовженням циклу робіт, які направлені на вивчення нового покоління газотурбінних систем невеликої електричної потужності. Модель газотурбінної установки нового покоління працює за оберненим циклом Брайтона та циклом Майсоценка, схема зображена на рис. 1. Конструктивна, математична та комп'ютерна модель такого типу газотурбінної установки (ГТУ) розроблено на основі багаторічного досвіду роботи співробітників з Інституту технічної теплофізики НАН України в області газотурбобудування та тепломасообмінних технологій. Перші теоретичні результати дослідження були присвячені ідеальному циклу і опубліковані у роботі [1], де продемонстрована і обґрунтована можливість створення газотурбінних установок з високою термічною та електричною ефективністю, яка значно перевищує ефективність всіх сучасних установок, що працюють за прямим та оберненим циклом Брайтона.

Інші дослідження в цій області були присвячені порівняльному аналізу техніко-економічних характеристик ідеального та політронного циклів. Результати цих досліджень та характерні коефіцієнти, які враховують політронну природу процесів: збереження загального тиску, повнота згорання палива, ефективність турбіни та компресора опубліковано у роботі [2].

Мета цієї роботи:

- визначити найбільш сприятливі, з технічної та економічної точки зору, умови роботи газотурбінної установки (рис. 1);

- встановити вплив температури та вологості атмосферного повітря на техніко-економічні характеристики.

1. Вхідні дані для розрахунку

Усі необхідні дані, які використовуються для розрахунку техніко-економічних характеристик політронного циклу, наводилися раніше у роботі [2]. Нижче указано лише величини, вплив яких аналізується на характер роботи ГТУ. Всі величини подані у міжнародній системі одиниць СІ.

- температура повітря на вході у сонячний нагрівач T_1 змінюється від 10°C до 30°C з кроком 5°C ;
- відносна вологість атмосферного повітря змінюється від 20% до 100% з кроком 20%;
- вологовміст атмосферного повітря визначається за психрометричною діаграмою Рамзіна-Мольє;
- температура паро-повітряної суміші перед турбіною T_4 змінюється від 180°C до 340°C з кроком 40°C , базова – 200°C .

2. Результати досліджень та їх аналіз

На рис. 1 продемонстрована схема газотурбінної установки, що працює за оберненим циклом Брайтона та циклом Майсоценка [1]. Послідовність термодинамічних процесів, яких зазнає робоче тіло у циклі, особливості цих процесів та рівняння за допомогою яких визначаються техніко-економічні характеристики, опубліковано у роботі [3]. Всі розрахунки проведено для газотурбінної установки електричною потужністю 10 кВт.

^аE-mail: iuriy.kochura@gmail.com

2.1. Оптимальні умови роботи ГТУ

З метою визначення найбільш сприятливих, з технічної та економічної точки зору, умов роботи газотурбінної установки було побудовано залежності ступеня стиснення повітря у компресорі π_{com} та коефіцієнта корисної дії (ККД) циклу η_{tp} від температури паро-повітряної суміші перед турбіною T_4 та температури повітря на вході в апарат Майсоценка T_2 . Як видно з графічного представлення цих залежностей, рис. 2, збільшення температури паро-повітряної суміші перед турбіною, як і слід було очікувати, призводить до зростання ККД циклу. Проте, таке зростання температури робочого тіла, також веде і до різкого зростання ступеня стиснення повітря у компресорі, а це, в свою чергу, накладає обмеження на діапазон технічно вигідних температур T_4 , при яких можна використовувати енергоощадні компресори, які характеризуються невеликими значеннями стиснення. На сьогоднішній день, найбільшою ступінню стиснення та значними енергозатратами характеризуються авіаційні турбореактивні двоконтурні двигуни. Як приклад – це Rolls-Royce Trent 1000, у якого ступінь стиснення повітря досягає 52, а масовий потік – 1290 кг/сек.

Аналізуючи рис. 2 та враховуючи, що зростання температури робочого тіла перед турбіною T_4 веде до зростання ступеня стиснення повітря у компресорі – це робить таку установку більш ресурсовимогливою; найбільше зростання ККД оберненого циклу Брайтона досягається у діапазоні значень ступеня стиснення до 15. У зв'язку з цими обставинами, за оптимальний варіант було вибрано температуру паро-повітряної суміші T_4 рівною 200° С. Тому подальші розрахунки техніко-економічних характеристик будуть розраховуватися саме для цієї температури.

2.2. Вплив вологості повітря навколишнього середовища

На рис. 3 наведено залежність ККД циклу від вологості повітря та його температури за сонячним нагрівачем. Як показали розрахунки, на ККД впливає лише температура повітря за сонячним нагрівачем і не впливає вологість атмосферного повітря. Якщо дивитися на ступінь регенерації теплоти рис. 4 – величина регенерації спадає із зростанням вологості повітря оточуючого середовища. При цьому, залежність регенерації від вологості зменшується по мірі збільшення температури повітря за сонячним нагрівачем. Що стосується масових витрат повітря газотурбінною установкою та води апаратом Майсоценка, а також теплових потужностей сонячного нагрівача, апарата Майсоценка, камери згорання і додаткового теплообмінника – то ці параметри ростуть із збільшенням вологості повітря навколишнього середовища. Інтенсивність росту та графіки цих залежностей не наведені у цій роботі. Також слід відзначити, що на величину ступеня стиснення повітря у компресорі не впливає вологість оточуючого середовища. Це стосу-

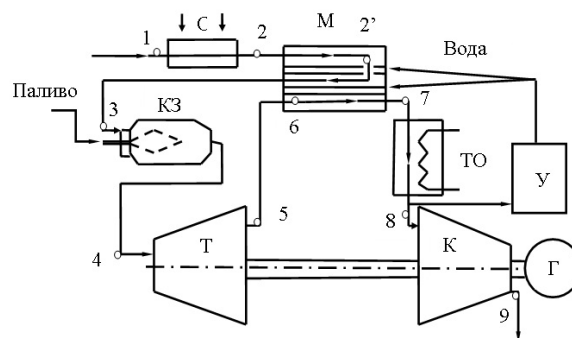


Рис. 1. Газотурбінна установка оберненого циклу Брайтона із тепломасообмінним апаратом Майсоценка [1]: С – сонячний нагрівник, М – апарат Майсоценка, КЗ – камера згорання, Т – турбіна, ТО – низькотемпературний теплообмінник, У – уловлювач льоду, К – компресор, Г – електрогенератор

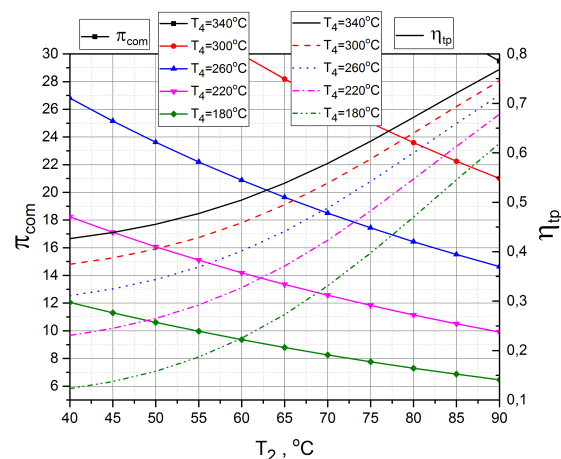


Рис. 2. Залежність ККД циклу η_{tp} та ступеня стиснення повітря у компресорі π_{com} від температури за сонячним нагрівачем T_2

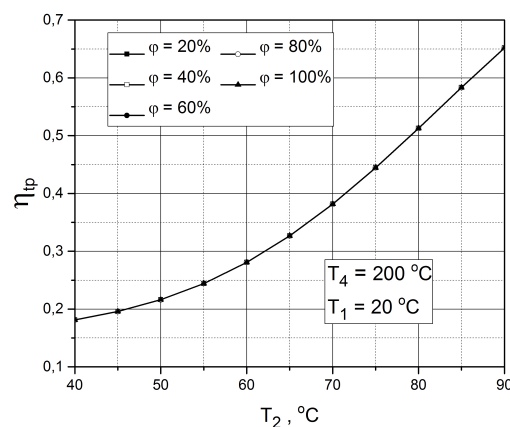


Рис. 3. Залежність ККД циклу η_{tp} від вологості повітря та його температури за сонячним нагрівачем T_2

ється і ступеня розширення паро-повітряної суміші у турбіні.

2.3. Вплив температури повітря навколишнього середовища

Результати розрахунків показали, що збільшення температури оточуючого середовища призводить до зменшення ККД цикла. Цей характер зменшення ККД установки із збільшенням температури T_1 подано на рис. 5. Так, для температури за сонячним нагрівачем $T_2 = 40^\circ \text{C}$ у випадку, коли температура повітря оточуючого середовища T_1 змінюється від 10°C до 30°C – ККД циклу зменшується від 20,92% до 15,33%. Тобто, збільшення температури оточуючого середовища на 20°C призвело до спадання ККД на 5,59%. Якщо брати до розгляду температуру $T_2 = 90^\circ \text{C}$ для тих самих температур T_1 , то ККД циклу зменшується від 66,39% до 64,01% – це еквівалентно спаданню ККД на 2,38%. По мірі росту температури повітря за сонячним нагрівачем, ступінь регенерації циклу Майсоценка різко зростає рис. 6. Таке зростання регенерації призводить до того, що ККД циклу починає все менше залежати від температури оточуючого середовища.

Сама ж ступінь регенерації слабо залежить від температури T_1 , рис. 6. Так, для температури за сонячним нагрівачем $T_2 = 40^\circ \text{C}$ у випадку, коли температура повітря оточуючого середовища T_1 змінюється від 10°C до 30°C – ступінь регенерації теплоти циклу Майсоценка зростає від 39,52% до 40,89%. Так само як і ККД, ступінь регенерації із збільшенням температури T_2 починає все менше і менше залежати від температури оточуючого середовища: при $T_2 = 90^\circ \text{C}$, регенерація зростає всього від 95,41% до 95,75%.

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 [3].

Що стосується ступеня стиснення повітря у компресорі та ступеня розширення паро-повітряної суміші у турбіні, як показали розрахунки, температура оточуючого середовища ніяк не впливає на ці значення. На них головним чином впливає лише температура паро-повітряної суміші перед турбіною та температура повітря на вході в апарат Майсоценка. Так, для температури паро-повітряної суміші перед турбіною $T_4 = 200^\circ \text{C}$ і температури $T_2 = 40^\circ \text{C}$, ступінь стиснення повітря у компресорі становить 14,88, а ступінь розширення паро-повітряної суміші у турбіні – 8,14. У випадку, коли $T_2 = 90^\circ \text{C}$ ступінь стиснення у компресорі спадає до 8,04, а ступінь розширення у турбіні – до 4,69.

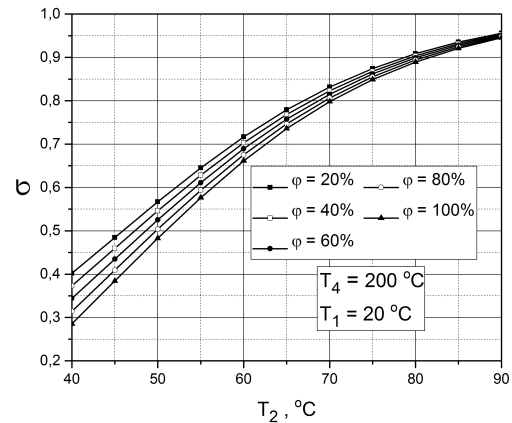


Рис. 4. Залежність ступеня регенерації теплоти в апараті Майсоценка σ від відносної вологості повітря φ та його температури на виході із сонячного нагрівача T_2

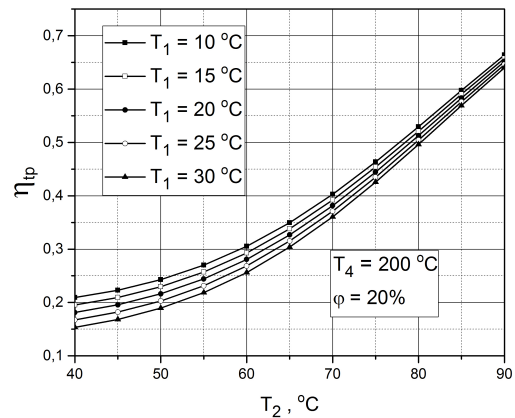


Рис. 5. Залежність ККД цикла η_{tp} від температури повітря на вході у сонячний нагрівач T_1 та на виході із нього T_2

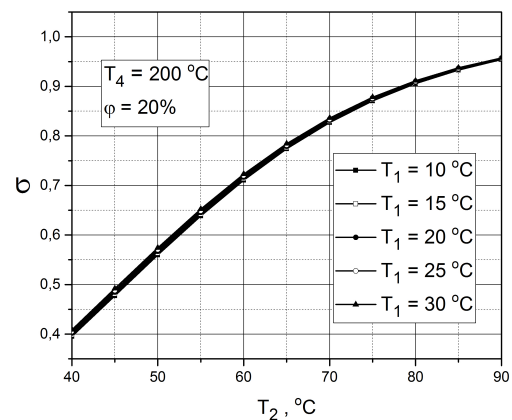


Рис. 6. Залежність ступеня регенерації теплоти в апараті Майсоценка σ від температури повітря на вході у сонячний нагрівач T_1 та на виході із нього T_2

Отримані результати розрахунків також показали, що масові витрати повітря газотурбінною установкою та води апаратом Майсоценка, а також теплові потужності апарата Майсоценка, камери згорання і додаткового теплообмінника ростуть із ростом температури повітря навколишнього середовища. Натомість, теплова потужність сонячного нагрівача зменшується.

Висновки

На основі проведеного кількісного та якісного аналізу отриманих результатів для політропного циклу газотурбінної установки, можна зробити такі висновки:

- найбільш сприятливою, з технічної та економічної точки зору, є температура паро-повітряної суміші перед турбіною, яка не перевищує 200°C;
- вологість атмосферного повітря не впливає на ККД установки та ступінь розширення/стиснення робочого тіла у турбіні/компресорі;
- збільшення вологості атмосферного повітря призводить до зменшення ступеня регенерації теплоти та збільшення масових витрат повітря та води газотурбінною установкою, а також теплових потужностей сонячного нагрівача, апарата Майсоценка, камери згорання і додаткового теплообмінника;
- збільшення температури оточуючого середовища призводить до зменшення ККД циклу та теплової потужності сонячного нагрівача;
- температура атмосферного повітря не впливає на ступінь розширення/стиснення робочого тіла у турбіні/компресорі;
- збільшення температури оточуючого середовища призводить до збільшення ступеня регенерації теплоти, масових витрат повітря та води газотурбінною установкою, а також теплових потужностей апарата Майсоценка, камери згорання і додаткового теплообмінника.

Слід зазначити, що значний інтерес представляють пілотні дослідження не лише газотурбінних установок, а й таких енергосистем як теплові насоси, градирні, апарати з опріснення води, де непряме випарне охолодження циклу Майсоценка може суттєво покращити їх техніко-економічні характеристики. Найбільш активно такі дослідження проводяться сьогодні в США, Україні, Об'єднаних Арабських Еміратах. Якщо брати до уваги масштаби України, використання градирень на основі циклу Майсоценка у складі енергоблоків потужністю 200 і 300 МВт, дасть можливість одержувати річну економію понад 25 млн. доларів США [4]. Використання таких підходів у енергетичній сфері, позитивно відобразиться як на економіці країни так і на рівні життя суспільства.

Перелік використаних джерел

1. Субатмосферный обратный цикл Брайтона с регенерацией теплоты по циклу Майсоценка / А. А. Халатов, С. Д. Северин, П. И. Бродецкий, В. С. Майсоценка — Доповіді Національної академії наук України, 2015. — с. 72–79.
2. Аналіз політропного субатмосферного термодинамічного циклу ГТУ з тепломасообмінним апаратом Майсоценка / А. А. Халатов, С. Д. Северин, Ю. П. Кочура, П. І. Бродецкий — Міжнародний науково-прикладний журнал «Промышленная теплотехника» НАН України, 2016. — с. 72–79.
3. Аналіз оберненого термодинамічного циклу газотурбінної установки із регенерацією теплоти за М-циклом / Ю. П. Кочура, А. А. Халатов — XIII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених, 2015. — с. 107–110.
4. 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.