

УДК 621.43

М.О. Дикий, А.С. Соломаха, В.Г. Петренко

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГПТУ “ВОДОЛІЙ” ОХОЛОДЖЕННЯМ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ В КОМПРЕСОРИ

We analyze the contact air cooling application method for gas-and-steam turbine technology “Aquarius” (GSTT “Aquarius”). We utilize the real GSTT “Aquarius” characteristics (capacity 16 MW) for calculations. We demonstrate the capacity of implementing the gas turbine engine air cooling process using superheated water. Using the oversaturated water, we elaborate the air cooling process in the adapter between the compressor of low pressure and the compressor of high pressure. We also determine the amount of water evaporated in the adapter eliminating water drops throwing down to the compressor’s inner surface. We propose to mount the grid packing for intensification of cooling process. It allows implementing the air deep chilling before the compression process begins. Moreover, the complex implementation of processes discussed increases by 25 percent GSTT “Aquarius” output and by 4 percent its efficiency.

### Вступ

Сьогодні перед газотурбінним двигуном (ГТД) стоїть завдання точно підтримувати технічні параметри й економічні показники незалежно від кліматичних умов роботи та сезону. Але, як відомо, висока температура повітря на вході в компресор, особливо в літній період, значно знижує вихідну потужність і ефективний ККД ГТД.

Одним зі способів, який дає можливість підвищити ефективність ГТД, є впорскування води в проточну частину компресора [1–7]. Це корисно як для випарного охолодження повітря в процесі його стиснення, так і для зменшення викидів оксидів азоту.

У той самий час реалізація процесу контактного охолодження вимагає великого об’єму води, що призводить до значних витрат на водопідготовку. Однак, якщо воду, подану в компресор, потім вловлювати на виході з установки, наприклад, шляхом її конденсації з відпрацьованих газів, як це відбувається в установках типу “Водолій”, то проблема водопідготовки вирішується значно простіше.

### Постановка задачі

Метою статті є аналіз застосування контактного способу охолодження циклового повітря для газопаротурбінної установки “Водолій” (ГПТУ “Водолій”). При цьому для розрахунку використано робочі параметри реальної ГПТУ “Водолій” із потужністю 16 МВт [8–9].

### Контактне охолодження циклового повітря ГПТУ “Водолій”

Контактне охолодження реалізується випаровуванням води безпосередньо в потоці повітря і не вимагає складного додаткового облад-

нання. Активний пошук оптимального варіанта реалізації цього способу охолодження повітря пов’язаний із бурхливим розвитком газопаротурбінних технологій (ГПТТ). У розробках різних компаній світу проаналізовано та проведено експериментальні дослідження впорскування води як на вхід компресора, так і в різні його ділянки. Відзначається значне (до 8 %) підвищення ККД компресора та зменшення викидів оксидів азоту газотурбінним двигуном.

Під час випаровування води в компресорі реалізується процес стиснення з одночасним охолодженням повітря, що з термодинамічної точки зору дуже вигідно. У працях [1–6] було виявлено характерні особливості протікання цього процесу. По-перше, за рахунок відцентрових сил відбувається значна сепарація крапель на корпус компресора, і, як наслідок, значно зменшується розмір змоченої поверхні лопаток, з якої випаровується вода. По-друге, внаслідок подачі і випаровування води на лопатках виникає загроза таких небажаних явищ, як ерозія та утворення накипу. Дослідженнями також встановлено, що максимальна кількість води, яка може подаватися в компресор, не має перевищувати за різними даними 1–2,5 % від витрати повітря. Оскільки при подачі більшої кількості вона не встигає випаровуватися в проточній частині компресора і у вигляді плівки сповзає по його корпусу в камеру згорання. Там вода довипаровується за рахунок теплоти палива, що відразу зменшує коефіцієнт корисної дії установки. Крім того, внаслідок впорскування води може спостерігатися неоднорідність температурного поля повітря [7], через що може проявлятися нестабільність у роботі компресора. Слід також зазначити, що всі вказані процеси доволі складні та мають багато

особливостей, які істотно залежать від конструктивного виконання конкретного двигуна.

З огляду на наведені факти серйозної уваги заслуговує інший спосіб контактного охолодження повітря, при якому повне випаровування всіх крапель відбувається до початку процесу стиснення [6]. Такий підхід дає змогу уникнути значної частини вказаних недоліків, пов'язаних зі впорскуванням води безпосередньо в компресорну зону.

Оскільки охолодження повітря відбувається завдяки фазовому переходу води, то очевидно, що перед розпиленням воду доцільно підігріти [3]. В газотурбінних установках необхідні параметри води можна отримати за рахунок утилізації теплоти відпрацьованих газів. Зокрема, в [9] було проаналізовано процес поглибленої утилізації теплоти відпрацьованих газів після котла-утилізатора ГПТУ "Водолій", у результаті якого за рахунок додаткового охолодження відпрацьованих газів можна отримати надлишкову насичену воду.

Завдяки реалізації процесу поглибленої утилізації теплоти [9] можна отримати насичену (або близьку до насичення) воду з тиском 20 бар. Цьому тиску відповідає температура насичення 212 °С.

На основі проведеного аналізу з'ясовано, що оптимальним місцем для подачі води є перехідник між компресорами високого та низького тиску, так як при цьому вдається реалізувати повне випаровування води до початку процесу безпосереднього стиснення, що, як вже зазначалося вище, є пріоритетним завданням. Параметри повітря за компресором низького тиску становлять  $p = 5$  бар,  $T = 206$  °С. Подача води відбувається через форсунки, які розпилюють воду на сітчасту насадку, встановлену в перехідник між компресорами.

Таким чином, вода до форсунок надходить в перегрітому стані відносно тиску повітряного потоку. На виході з них вона закипає і частково перетворюється в пару. Оскільки параметри води, що надходить у форсунки,  $p_1 = 20$  бар і  $T_1 = 212$  °С (рис. 1), а тиск повітря  $p_2 = 5$  бар, то кількість пари, отриманої внаслідок адиабатного розширення, характеризується відрізком  $a-2$  (для цих умов ступінь сухості  $x = 12$  %). Після форсунок параметри води відповідають тиску  $p_2 = 5$  бар і температурі  $T_2 = 152$  °С (процес дроселювання у форсунці показано лінією  $1-2$ ).

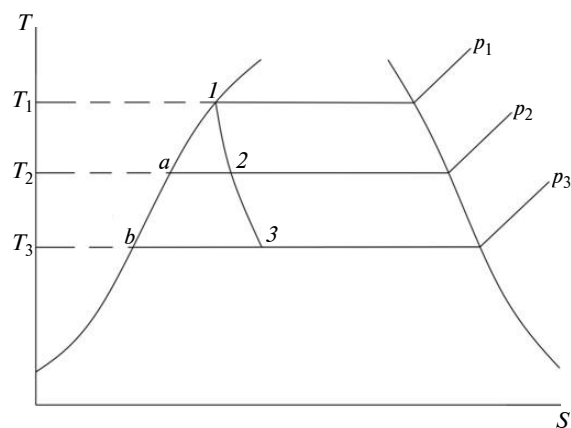


Рис. 1. Процес охолодження перегрітої води в повітряному потоці

При взаємодії повітря та води проходить одночасно кілька процесів, які взаємно впливають один на одного. До них належать такі: дифузія, молярне перенесення теплоти та маси, променистий теплообмін, термічна дифузія і неізотермічна масопровідність. У нашому випадку абсолютна вологість повітря мала, тому низький в ньому й парціальний тиск пари, а пружність пари біля поверхні розпиленої крапель висока. Через це з'являється рухома сила масообміну, під дією якої пара, що утворюється на поверхні краплі, переходить у прилеглі шари повітря. А далі, під дією дифузії – в основний об'єм повітря.

Процес масовіддачі особливо бурхливо проходить у початковий момент, коли різниця у тисках пари біля поверхні краплі та в повітрі максимальна. Теплота, витрачена на випаровування води, надходить від двох джерел: самої краплі та повітря.

Кількість теплоти, що підводиться до краплі від повітря, дорівнює

$$q_1 = \alpha (T_n - T_{кр}), \quad (1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну;  $T_n$  – температура повітря;  $T_{кр}$  – температура краплі.

Кількість теплоти, що відводиться від краплі у вигляді пари, визначається за формулою

$$q_2 = \beta r (d_{кр} - d_n), \quad (2)$$

де  $r$  – прихована теплота пароутворення;  $\beta$  – коефіцієнт теплоперенесення;  $d_{кр}$  і  $d_n$  – паровміст біля поверхні краплі та в повітряному потоці відповідно.

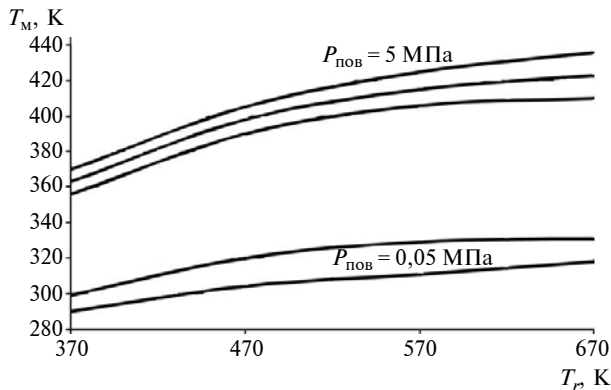


Рис. 2. Залежності зміни температури термодинамічної рівноваги

Далі, як відомо [10], якщо нагріту рідину подавати в диспергованому вигляді в повітряний ненасичений потік з відносно високим тиском (а саме такі умови після компресора низького тиску), то за законом рівноважного стану парорідинних сумішей краплі рідини під дією рушійних сил тепло- і масообміну починають охолоджуватися і прагнуть до температури термодинамічної рівноваги, якою для цього випадку є температура мокрого термометра. Процес охолодження показано на рис. 1 відрізком 2–3, а сумарна кількість пари, що генерується в цьому випадку, характеризується відрізком  $b-3$ . Кількість пари, згенерованої в процесі охолодження (відрізок 2–3), дорівнює різниці довжин відрізків  $b-3$  і  $a-2$  та характеризує глибину охолодження рідини в повітряному потоці.

Термодинамічна рівновага настає у момент вирівнювання потоків  $q_1$  та  $q_2$ , тобто при  $q_1 = q_2$ . Прирівнявши праві частини рівнянь (1) та (2), отримуємо аналітичний вираз для температури термодинамічної рівноваги:

$$T_m = T_n - \frac{r \beta}{\alpha} (d_{кр} - d_n).$$

Графічно зміну температури термодинамічної рівноваги крапель води в потоці повітря залежно від температури і тиску наведено на рис. 2 [10]. Із нього випливає, що при тиску повітря 5 бар температура мокрого термометра крапельної рідини не перевищує 100 °С (373 К), тоді як температура повітря після стиснення становить 206 °С. Очевидно, що при такій різниці температур рушійна сила теплообміну направлена в бік рідини, внаслідок чого повітря буде охолоджуватися, а його теплота піде на випаровування крапель води.

Для аналітичного визначення температури термодинамічної рівноваги з великим ступенем точності коефіцієнти тепло- та масовіддачі можна замінити їх відношенням:

$$\frac{\alpha}{\beta} = c_{pc},$$

де  $c_{pc}$  – ізобарна теплоємність парогазової суміші.

Отримане рівняння розв'язується методом послідовних наближень. Для параметрів ГПТУ “Водолій”  $T_m = 83,2$  °С.

Після досягнення краплею температури мокрого термометра подальше її випаровування відбувається за лінійним законом  $dS/dt = \text{const}$  завдяки теплоті, що відбирається від повітря через різницю пружностей пари біля поверхні краплі та в об'ємі повітря.

Зміну температури води та повітря наведено на рис. 3.

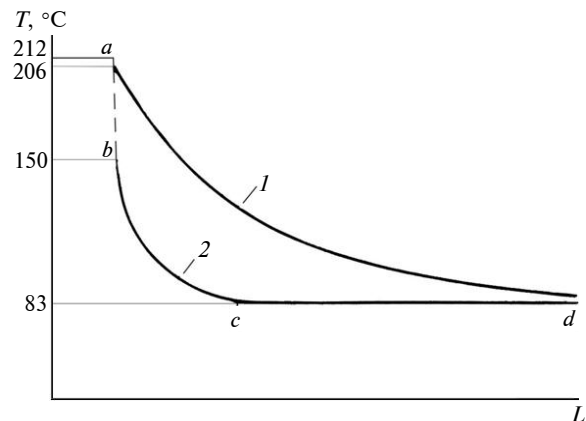


Рис. 3. Зміна температури води та повітря по довжині переходника між компресорами

На початковому етапі внаслідок подачі перегрітої води відбувається бурхливий процес тепломасообміну за рахунок розширення води у форсунках на відрізку  $a-b$  та охолодження води до температури мокрого термометра на відрізку  $b-c$  (див. рис. 2).

При досягненні краплями температури  $T_m$  у ненасиченому повітряному потоці відведення теплоти не припиняється. Воно продовжується при постійній температурі крапель на відрізку  $c-d$  (див. рис. 2). Для інтенсифікації процесу на цьому відрізку в перехідник між компресорами встановлюється сітчаста насадка, яка дає можливість повністю реалізувати процес випаровування води в межах перехідника між компресорами низького та високого тиску [11].

Під час реалізації вказаного процесу за результатами проведених досліджень вдається випарувати набагато більше води (до 7% від витрати повітря), через що циклове повітря на вході в компресор високого тиску охолоджується з 206 до 85 °С, що забезпечує значне зменшення споживання роботи на привід компресора високого тиску.

Отримане зменшення споживання роботи і одночасне збільшення при цьому кількості робочого тіла в циклі енергетичної установки підвищує її потужність з 16 до 20 МВт, а ефективний ККД зростає при цьому з 42 до 46%.

### Висновки

Процес конденсації води з відпрацьованих газів, що має місце в ГПТУ "Водолій", дає змогу значно підвищити ефективність контактного охолодження циклового повітря, оскільки зникає необхідність у постійному підживленні води.

Впорскування в повітря перегрітої води сприяє значному покращенню процесу теплома-

сообміну. При цьому важливо, що перегріта вода отримується за рахунок додаткового більш глибокого охолодження відпрацьованих газів ГТД.

Процес тепломасообміну при подачі диспергованої перегрітої води в потік повітря можна поділити на два етапи: динамічний (бурхливий процес тепломасообміну від моменту впорскування води до досягнення нею температури мокрого термометра) та статичний (охолодження повітря при постійній температурі крапель води).

Для інтенсифікації процесу охолодження на статичній ділянці запропоновано встановити сітчасту насадку. Це дає змогу здійснювати глибоке охолодження повітря до початку процесу безпосереднього стиснення.

Комплексна реалізація розглянутих процесів веде до підвищення потужності ГПТУ "Водолій" на 25% та збільшення її ККД на 4%.

Важливим моментом для майбутніх досліджень є оптимізація роботи сітчастої насадки, яка є ключовим елементом для реалізації цього способу охолодження.

1. Романов В.И., Дикий Н.А., Жирицкий О.Г и др. Изменение характеристик ГТД при впрыске воды на вход в компрессор // Изв. акад. инженерных наук Украины: Сб. "Машпроект – 45 лет", 1999. – Вып. 1. – С. 155–159.
2. Серета С.О., Гельмедов Ф.Ш., Мунтянов И.Г. Экспериментальное исследование влияния впрыска воды во входной канал многоступенчатого осевого компрессора на его характеристики // Теплоэнергетика. – 2004. – № 5. – С. 66–71.
3. Ануров Ю.М., Пеганов А.Ю., Скворцов А.В. и др. Расчетное исследование влияния впрыска воды на характеристики компрессора газотурбинной установки ГТ-009 // Теплоэнергетика. – 2006. – № 12. – С. 19–24.
4. Арсеньев Л.В., Беркович А.Л. Параметры газотурбинных установок с впрыском воды в компрессор // Теплоэнергетика. – 1996. – № 6. – С. 18–22.
5. Скворцов А.В. Повышение параметров газотурбинных установок путём впрыска воды в проточную часть и оптимизации рабочего процесса в компрессоре: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2010. – 174 с.
6. Cataldi G., Güntner H., Matz C. et al. Influence of High Fogging Systems on Gas Turbine Engine Operation and Performance // J. Eng. Gas Turbines Power. – January 2006. – P. 135–144.
7. Chaker M. Inlet Fogging of Gas Turbine Engines // Proc. of ACME TURBO EXPO 2000, June 3–6. – Amsterdam, 2002. – P. 113–138.
8. Дикий Н.А., Пятничко А.И., Карп И.Н. Производство электрической и тепловой энергии по газопаровому циклу на комбинированном угольном и газовом топливе // Экологическая и ресурсосбережение. – 2006. – № 2. – С. 3–7.
9. Дикий М.О., Уваричев О.М., Соломаха А.С. Новітня газопаротурбінна технологія "Водолій" для виробництва механічної (електричної) і теплової енергії та її впровадження в енергетичному комплексі України // Енергетика, економіка, технології, екологія. – 2009. – № 1. – С. 16–19.
10. Дикий Н.А. Судовые газопаротурбинные установки. – Л.: Судостроение, 1978. – 262 с.
11. Шкляр В.И. Интенсификация тепломассообмена в контактном конденсаторе с сетчатой насадкой: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – К., 2003. – 154 с.