

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗВОЛОЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ДО ТУРБИНИ ПОВІТРЯНОЇ ТЕПЛОУТИЛІЗУЮЧОЇ ТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ УТИЛІЗАЦІЇ ВИКИДНОЇ ТЕПЛОТИ

В. Ю. Туряб^{1, а}, О. С. Коваленко², С. М. Пономаренко¹

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Фізико-технічний інститут

²Інститут технічної теплофізики НАН України

Анотація

У роботі надані результати досліджень одного з шляхів підвищення ефективності роботи установки повітряного циклу, яка може застосовуватися з метою утилізації теплоти за приводними газотурбінними установками (ГТУ) газотранспортної системи (ГТС) України.

Ключові слова: газотранспортна система, утилізація теплоти, повітряна теплоутилізуюча турбінна установка, зволоження повітря

Вступ

ГТС України – одна з важливих галузей економіки країни. Тому забезпечення її ефективної експлуатації є вкрай актуальним питанням сьогодення. Компресорні станції, що встановлені на магістральному газопроводі, призначені для підвищення тиску газу з метою зменшення його об'єму, живляться у 82 % випадків обертаються газотурбінними двигунами (ГТД). Основною проблемою експлуатації ГТД є їх низька економічність. Так ККД застарілих двигунів складає лише 23 – 25 %, що на 10 % нижче за показники аналогічних двигунів зарубіжжя. До того ж біля 70 % агрегатів з газотурбінним приводом, які перекачують газ, вже практично виробили свій ресурс (100 тис. годин). Подальша експлуатація фізично зношених та конструкційно застарілих ГТД веде до значних втрат палива, що має велику вартість. В пошуках вирішення цієї проблеми спеціалісти звернулися до утилізації продуктів згорання з наявною температурою 600...800 К, що виходять з робочого тракту ГТД [1].

Наразі існує багато способів та установок для збільшення ККД шляхом утилізації теплоти. В даній роботі запропоновано використання найбільш безпечної з них, де в якості основного і додаткового робочого тіла виступають, відповідно, повітря та водяний пар, а в якості камери згорання – теплообмінний апарат (ТА).

1. Установка

Установка (рис. 1) включає в себе: основну ГТУ, як джерело теплоти для повітряної теплоутилізуючої турбінної установки (ПТТУ). ТА – теплообмінний

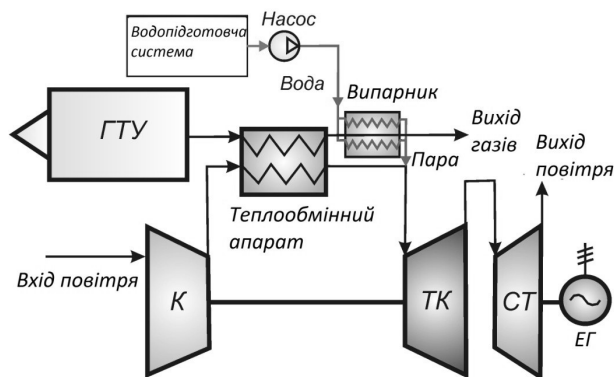


Рис. 1. Типова схема ГТП з ПТТУ на компресорній станції

апарат; електричний генератор змінного струму та елементи ПТТУ: К – компресор; випарник; ТК – турбіна компресора і СТ – силовий турбіна. Установка має наступний принцип роботи. Стисле в компресорі ПТТУ повітря підігрівається ТА за рахунок теплоти гарячих газів, що виходять з основної ГТУ. Оскільки температура гарячих газів ГТУ на виході з ТА ще досить велика, то частина цієї теплоти витрачається на випаровування води в додатковому випарнику, в який насосом подається підготовлена вода. Далі отримана в випарнику водяна пара змішується з сухим гарячим повітрям ПТТУ, що виходить з теплообмінника і потім вологе повітря подається до турбіни ПТТУ. При цьому частина тепловперепаду спрацьовується в турбіні компресора, а інша частина тепловперепаду спрацьовується в силовій турбіні, яка обертає електричний генератор змінного струму.

^аvickytyuryab@gmail.com

2. Математична модель

Для перевірки впливу зволоження повітря на вході в повітряну турбіну на ефективність роботи ПТТУ була допрацьована розроблена раніше математична модель ПТТУ. Зокрема, в математичну модель була додатково додана модель випарника води (парогенератора). Так питома ізобарна теплоємність на вході в турбіну після умовного процесу змішування сухого повітря і пара визначалася з вираження:

$$C_{pAIR}^{wet} = C_{pAIR} + d \cdot C_{pST},$$

де C_{pAIR}^{wet} – питома теплоємність вологого повітря на вході в турбіну; C_{pAIR} – питома теплоємність сухого повітря за компресором ПТТУ; $C_{pST} = 1875,6864 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ – питома теплоємність водяної пари; d – вологовміст повітря на вході в турбіну; $d = G_{AIR}^{wet}/G_{AIR}$.

При цьому, питома теплоємність сухого повітря на виході з компресора визначалася в залежності від його температури:

$$C_{pAIR} \sim T_{AIR}$$

Газова постійна вологого повітря на вході в турбіну визначалася з виразу:

$$R_{AIR}^{wet} = \frac{R_{AIR} + d \cdot R_{ST}}{1 + d}$$

де $R_{air} = 287 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ – газова постійна повітря; $R_{ST} = 461,5 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ – газова постійна водяної пари.

Температура вологого повітря на вході до турбіни визначалась з виразу:

$$T_{AIR}^{wet} = \frac{T_{AIR} + d \cdot T_{ST}^{out}}{1 + d}$$

де T_{AIR} – температура сухого повітря на виході з компресора; T_{ST}^{out} – температура пари на виході з випарника.

Тиск на вході до турбіни у відповідності до закону Дальтона визначався як сума парціальних тисків сухого повітря та водяної пари з виразу:

$$P_{AIR}^{wet} = P_{AIR} + d \cdot P_{ST}^{out}$$

Витрата вологого повітря через повітряну турбіну визначався з виразу:

$$G_{AIR}^{wet} = G_{AIR}(1 + d)$$

Як ми бачимо додаткове робоче тіло – водяна пара – володіє теплоємністю, що майже вдвічі перевищує теплоємність повітря, що в свою чергу збільшує температуру та тиск на вході до турбіни[2] та помітно впливає на її потужність та ефективність ПТТУ вцілому.

Розроблена математична модель з доданим блоком розрахунків для пари дозволила отримати оцінку впливу зволоження повітря на вході в повітряну турбіну ПТТУ на її характеристики.

3. Отримані результати

3.1. Залежність повного ККД ПТТУ від зволоження повітря.

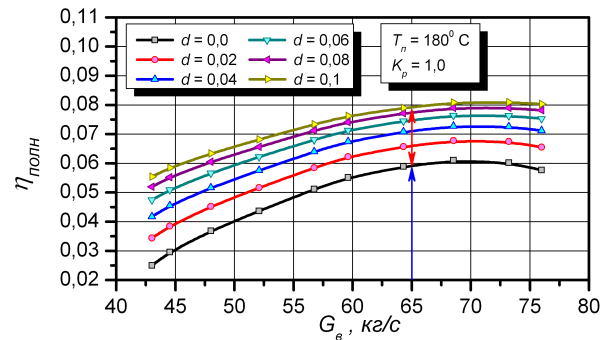


Рис. 2. Залежність повного ККД ПТТУ від витрати повітря через ПТТУ для різних значень вологовмісту повітря на вході до турбіни

На рис. 2 показані залежності повного ККД ПТТУ від витрати повітря для різних значень вологовмісту повітря на вході до турбіни. З порівняння наведених залежностей видно, що з ростом вмісту води повітря на вході в турбіну ККД корисної роботи ПТТУ істотно збільшується. Так в прийнятій розрахунковій точці ($G_{AIR}^{wet} = 65 \text{ кг/с}$), збільшення вмісту води повітря на вході в турбіну $d = 0,02 \text{ кг пари/кг повітря}$ призводить до зростання ККД вільної турбіни на 11% (відносних), а збільшення вмісту води повітря на вході до турбіни до $d = 0,1$ призводить до зростання ККД вільної турбіни на 33%. Всі ці значення відповідають температурі пара на виході з випарника – пароперегрівача $T_{ST}^{out} = 180^\circ\text{C}$. При малих значеннях вмісту води повітря на вході в турбіну в залежності від ККД помітні максимуми поблизу витрати повітря 70 кг/с.

3.2. Залежність потужності силової турбіни ПТТУ від зволоження повітря.

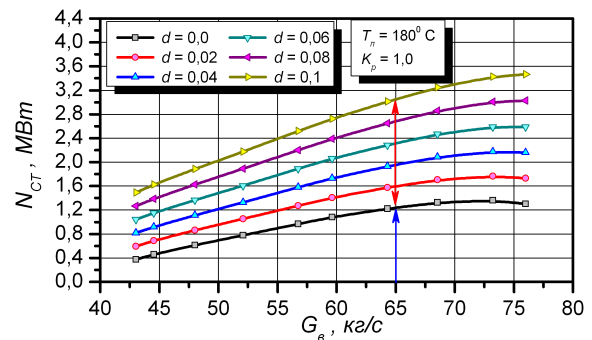


Рис. 3. Залежність потужності силової турбіни ПТТУ від витрати повітря через ПТТУ для різних значень вологовмісту повітря на вході до турбіни

На рис. 3 показані залежності потужності силової турбіни ПТТУ від витрати повітря для різних значень вологовмісту повітря на вході в турбіну. З аналізу наведених залежностей видно, що з ростом вмісту води повітря на вході в турбіну потужності силової турбіни ПТТУ збільшується. Так в прийнятій розрахунковій точці, збільшення вмісту води повітря на вході в турбіну при $d = 0,02$ призводить до зростання потужності силової турбіни ПТТУ на 29%, а збільшення вмісту води повітря на вході в турбіну до $d = 0,1$ призводить до зростання потужності силової турбіни ПТТУ на 150%. Всі ці значення відповідають температурі пара на виході з випарника – пароперегрівача $T_{ST}^{out} = 180^\circ\text{C}$. При малих значеннях вмісту води повітря на вході в турбіну залежності потужності силової турбіни ПТТУ так само, як і для сухого повітря, протікають по кривим зі слабо вираженим максимумом.

3.3. Залежність повного ККД енергетичної установки від зволоження повітря.

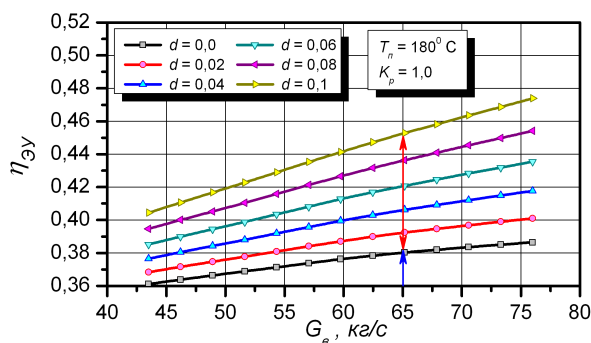


Рис. 4. Залежність повного ККД енергетичної установки з ПТТУ від витрати повітря через ПТТУ для різних значень вологовмісту повітря на вході до турбіни.

На рис. 4 показано залежності повного ККД енергетичної установки з ПТТУ від витрати повітря для різних значень вологовмісту повітря на вході до турбіни. З аналізу наведених залежностей видно, що з ростом вмісту води повітря на вході в турбіну

повний ККД енергетичної установки збільшується. У прийнятій розрахунковій точці, збільшення вмісту води повітря на вході в турбіну при $d = 0,02$ кг призводить до зростання повного ККД на 3,7%, а збільшення вмісту води повітря на вході в турбіну $d = 0,1$ кг призводить до зростання повного ККД енергетичної установки на 21,5%. Повний ККД енергетичної установки з ПТТУ монотонно зростає зі збільшенням витрати повітря і тим інтенсивніше, чим вище вміст води повітря на вході в турбіну.

Висновки

Дослідження впливу зволоження повітря на вході до турбіни ПТТУ, схема якої запропонована авторами, у наданому діапазоні її роботи ($G_{AIR}^{wet} = 45 \dots 75$ кг/с; $T_{ST}^{out} = 180^\circ\text{C}$; $d = 0,02 \dots 0,1$ кг) довели:

- 1) зволоження повітря на вході до турбіни ПТТУ приводить до збільшення повного ККД ПТТУ на всьому діапазоні досліджених витрат повітря через ПТТУ та параметрів зволоження;
- 2) за малих значеннях вмісту води повітря на вході в турбіну в залежності від повного ККД помітні максимуми поблизу витрати повітря 70 кг/с;
- 3) зволоження повітря на вході до турбіни ПТТУ приводить до збільшення потужності силової турбіни на всьому діапазоні досліджених витрат повітря через ПТТУ та параметрів зволоження;
- 4) збільшення зволоженості повітря на вході до ПТТУ призводить до рівномірного збільшення повного ККД енергетичної установки з ПТТУ за всіх витратах повітря через ПТТУ, але тим більшого, чим більші витрати цього повітря.

Перелік використаних джерел

1. Халатов А. А., Северин С. Д., Бурлака В. В. Анализ воздушного цикла утилизации теплоты горячих газов за газотурбинными приводами ГТС Украины // Промышленная теплотехника. — 2014. — Т.6, №4. — 18-25 с.
2. Полетаевкин П. Г. Как улучшить технико-экономические показатели ГТУ // Газовая промышленность. — 1984. — №10.