

В. І. Мілованов, д.т.н., О. Л. Клебан

Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ

В теперішній важкий економічний час для України як ніколи є актуальною тематика знаходження перспективних напрямків підвищення якості та ефективності компресорних станцій. Оскільки саме компресорна техніка займає значну долю енергетичного обладнання країни, то і напрямки підвищення її ефективності відкривають перспективи більш раціонального використання енергії.

Ключові слова: енергетика, якість, газова турбіна, компресор, компресорна станція.

Вступ

Постановка проблеми в загальному вигляді. У зв'язку з Євроінтеграцією України, складним економічно-енергетичним становищем нашої країни необхідно звернути увагу на енергетичну галузь, її низьку ефективність та невідповідність сучасним нормам. Промисловість України, сьогодні починає висувати серйозні вимоги до паливно-енергетичного комплексу країни, забезпеченню надійного і економічного енергопостачання, а також транзиту енергоресурсів за рахунок створення та модернізації нових енергоблоків.

Одночасно з новими вимогами, особливістю енергетики України є надзвичайно високий моральний і фізичний знос газоперекачуючого компресорного обладнання, яке потребує протягом найближчого десятиріччя практично повної заміни або глибокої модернізації. Другою особливістю енергетики України є те, що основним видом палива на найближчу перспективу є природний газ, частка якого в паливному балансі складає біля 50 – 60 %. Однак родовища природного газу в країні обмежені, і значну частину цього палива треба закуповувати за кордоном, витрачаючи значні кошти з державного бюджету. Як відомо, найбільш ефективним обладнанням є парогазові та газотурбінні регенеративні установки, що мають високий ККД. Великим плюсом є те, що ці установки можуть бути виготовлені на енерго-машинобудівних підприємствах України. Саме тому модернізація і підвищення ефективності енергетичних установок газотранспортної системи (ГТС) є актуальною задачею для енергетики нашої країни.

На базі проведеного огляду і аналізу публікацій, що характеризують стан вітчизняних ГТС, сформувано мету і задачі нашого дослідження.

Метою дослідження є визначення найбільш ефективних і перспективних шляхів підвищення ефективності компресорних станцій ГТС.

Для цього слід вирішити такі задачі:

1. Аналіз балансу енергії у відкритому циклі газотранспортної установки (ГТУ).

2. Визначення основних шляхів зменшення теплової енергії, що викидається на ГТС.

3. Порівняльний аналіз конкретних методів підвищення ефективності ГТС.

4. Визначення основних методів і організаційно-технічних заходів, що дозволять підняти технічний і енергетичний рівень вітчизняної ГТС до сучасного світового науково-технічного рівня.

Виклад основного матеріалу досліджень.

Вітчизняна ГТС є другою за масштабами в Європі після російської. Її потужність на вході становить 287,7 млрд. куб. метрів на рік, на виході – 178,5 млрд. куб. метрів на рік. Загальна протяжність газопроводів становить 38,55 тис. кілометрів, з яких 23 тис. кілометрів – магістральні газопроводи. До складу системи входять 73 компресорні станції (КС) (110 компресорних цехів) загальною потужністю 5,4 ГВт, 1455 газорозподільних станцій, 287 тис. кілометрів газової розподільної мережі, 14,8 тис. мережних газових станцій. ГТС спроможна щороку транспортувати у напрямку 18 країн Європи до 143 млрд. куб. метрів природного газу [1]. Україна має одну з найпотужніших в Європі мереж підземних сховищ газу (ПСГ), яка є важливою технологічною частиною газотранспортної системи, що забезпечує надійність як внутрішнього газопостачання, так і транзитних поставок російського газу до європейських країн. ПСГ об'єднані в такі чотири комплекси, як Західноукраїнський (Прикарпатський), Київський, Донецький і Південноукраїнський. Усі ПСГ (іх 12) обладнані за аналогічними технічними проектами. Загальна ємність ПСГ становить 32 млрд. куб. метрів. Максимальний добовий відбір газу з ПСГ у разі повного заповнення може становити 240 млн. куб. метрів, що забезпечить безперебійне постачання газу на внутрішній ринок, а також транзит російського газу до європейських країн.

Газотурбінний двигун (ГТД), який являє собою невід'ємну частину ГПА – це різновид теплого двигуна, який працює за простим принципом. Багатоступінчастий компресор стискає атмосферне повітря і подає його під високим тиском в камеру згоряння для створення паливо-повітряної суміші. При згоранні паливо виділяє велику кількість енергії. Одержана енергія за рахунок обертання потоками розпеченого газу лопатей турбіни перетворюється в механічну роботу.

Деяка частина отриманої роботи витрачається на стиснення повітря в компресорі ГТД, а інша частина роботи передається на електричний генератор. Робота, споживана цим агрегатом, є корисною роботою. Відпрацьовані в ГТД гази виділяються через вихідний патрубок в атмосферу.

значною металомісткістю і низькою економічністю (ККД не більше 24 – 26%), що вимагали значного періоду часу і собівартості монтажу.

Надалі, в експлуатацію почали надходити конвертовані авіаційні та судові газотурбінні двигуни, які були розроблені оборонними підприємствами. Їх використання відіграло дуже позитивну роль тому, що дало можливість збільшити ККД двигунів, забезпечило постачання ГПА в блочно-контейнерному виконанні і скоротило термін спорудження КС до 10 – 18 місяців [2].

Основними перевагами використання ГТД порівняно з ДВЗ, є швидкий запуск турбіни з холодного стану (15 – 30 хв.), відносно малі габарити та маса, порівняно високий ККД (до 36 %), простота та надійність конструкції, зосередження великої потужності в одному агрегаті, відсутність значних вібрацій незалежно від виду зовнішніх джерел енергії.

До основних недоліків цих двигунів слід віднести низьке напруження на відмову (всього 1 – 3 тис. год.), невеликий термін служби (50 – 60 тис. год.) і малий ресурс до капітального ремонту (10 – 20 тис. год.). Оскільки капітальний ремонт таких двигунів може проводитися тільки в заводських умовах, суттєво зростають витрати на періодичний ремонт двигуна [2].

Перелічені недоліки пов'язані, насамперед, з особливостями конструкцій газотурбінних двигунів військового призначення, при проектуванні яких основну увагу приділяють потужності і маневреності, а надійність за тривалої експлуатації, ресурс і економічність мають другорядне значення.

Промислові ГТД для ГТС слід проектувати з урахуванням специфіки їх експлуатації на газопроводах. При цьому їх високі характеристики можуть бути досягнуті за рахунок використання

найсучасніших газотурбінних технологій, застосовуваних в авіаційних і судових ГТД [3].

Серйозною проблемою сьогодні є низька економічність та ККД застарілих ГТД, які складають лише 23 – 25 %. Основні показники більшості ГТД, що експлуатуються в Україні, нижчі за показники зарубіжних двигунів аналогічної потужності, які мають повний ресурс до 150 тис. годин і ККД на рівні 34 – 38 %. Пояснити це можна тим, що біля 70 % вітчизняних ГПА з газотурбінним приводом практично виробили свій ресурс. Подальша експлуатація фізично зношених та морально застарілих ГТД може призвести до нездатності ГТС України забезпечувати надійну подачу природного газу [4].

Вихід із ситуації полягає в якнайшвидшій розробці нового покоління двигунів, призначених для експлуатації на ГТС України. Найбільш важливими якостями таких ГТД є безпека і надійність за умов тривалої експлуатації, висока економічність (ККД), відносна простота конструкції й експлуатації, низька вартість експлуатаційного циклу.

Аналіз балансу енергії у відкритому циклі ГТД простої схеми показує, що значна частина її у вигляді кінетичної і теплової енергії безповоротно втрачається з газами, що викидаються (рис. 1).

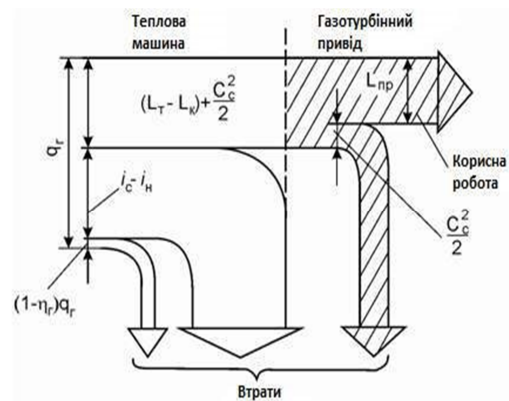


Рисунок 1 – Аналіз втрат на ГТД

Сумарна величина цих втрат визначається різницею повних ентальпій продуктів згоряння за силовою турбіною і атмосферного повітря. При цьому у випускному патрубку двигуна відбувається лише деяке зменшення частки кінетичної енергії на користь теплової.

Ступінь досконалості ГТД, робочий процес якого об'єднує функції як теплової машини, так і газотурбінного привода, оцінюють за допомогою ККД циклу [5]. У технічній літературі його також називають повним або енергетичним ККД () [6]. Він являє собою відношення роботи на валу привода () до кількості теплоти

(), підведеної до 1 кг робочого тіла.

Наразі відомо кілька шляхів зменшення теплової енергії, що викидається, реалізованих в реальних конструкціях або ж запропонованих в проектах. Концептуально вони розрізняються методами вилучення цієї енергії з продуктів згорання і подальшого її використання. Залежно від схеми використання теплової енергії, що відбирається, розрізняють її регенерацію та утилізацію.

При регенерації в якості теплоносія використовується робоче тіло циклу (у випадку ГТД – повітря). Для утилізації вихідних газів застосовують окреме робоче тіло.

Головну роль при цьому відіграє вибір теплоносія, який транспортує теплоту, що відбирається. Саме його властивості визначають можливість подальшого перетворення теплової енергії в інші види, зручні для практичного застосування [7].

Підвищення ефективності ГТС шляхом регенерації.

В українській ГТС на КС досить широко (25 % парку ГТП) застосовується регенерація теплоти вихідних газів.

Регенерація теплоти – підігрів повітря після компресора вихлопними газами – можлива за умови, що температура газу за турбіною вище за температуру газу за компресором $T_m > T_k$. Для цього в схему установки необхідно ввести додатковий пристрій – теплообмінний апарат (ТА). Схема ГТД з регенерацією теплоти представлені на рис. 2.

Повітря після компресора направляється в ТА, де воно отримує теплоту від газів, що вийшли з турбіни. Після підігріву повітря надходить в камеру згорання, що забезпечує певну економію палива, що витрачається для досягнення необхідної температури газу перед турбіною. Таким чином питомі витрати палива зменшуються, а ККД ГТП збільшується.

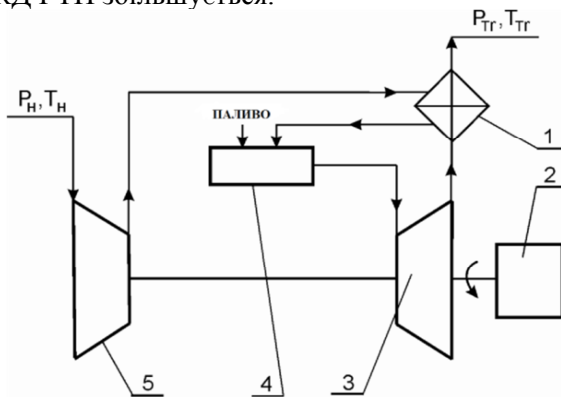


Рисунок 2 – Схема ГТУ з регенерацією теплоти: 1 – теплообмінник; 2 – споживач; 3 – турбіна; 4 – камера згорання; 5 – компресор

У $T-S$ координатах ідеальний цикл з регенерацією теплоти виглядає наступним чином (рис. 3). У процесі 4 – 5 продукти згорання охолоджуються в ТА і ця теплота передається повітрю в процесі 2 – 6.

При повній регенерації (ідеальному ТА) повітря можна нагріти до температури T_6 , що дорівнює температурі T_4 , а продукти згорання охолодити до температури T_5 , що дорівнює температурі повітря T_2 .

Робота циклу залишається незмінною, а кількість підведеної теплоти зменшується; тепер теплота (q_1^p) підводиться в камері згорання тільки в процесі 6 – 3.

У реальних умовах теплота регенерації передається не повністю, оскільки теплообмінники неідеальні. Нагрівання повітря здійснюється до точки $6'$, а продукти згорання охолоджуються до точки $5'$

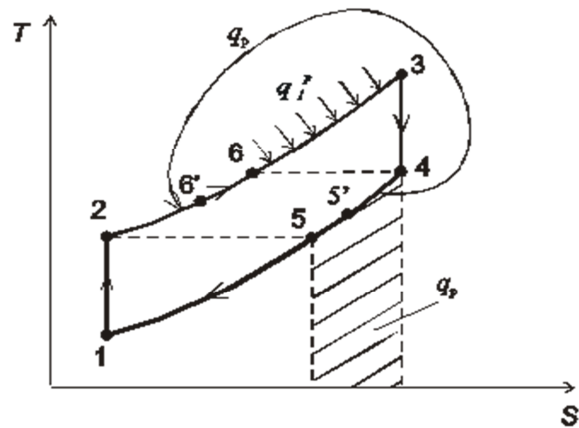


Рисунок 3 – $T-S$ діаграма ідеального циклу ГТД з регенерацією теплоти

Підвищення ефективності ГТС за рахунок утилізації тепла. Наразі існує багато способів збільшення ККД шляхом утилізації теплоти вихідних газів. Серед них виділяють: комбіновані установки з паросиловим циклом, установки з низькотемпературним циклом Ренкіна, установки на основі тригенераційних технологій, газоповітряні турбінні установки.

Комбіновані установки з паросиловим циклом. Термодинамічна сутність комбінованого циклу полягає в тому, що теплота одного робочого тіла, невикористана в основному циклі, підводиться в додатковому циклі до іншого робочого тіла. Якщо на виході з додаткового циклу відпрацьоване в ньому робоче тіло основного циклу ще зберігає свій тепловий потенціал щодо навколишнього середовища, то процес повторюється, але на основі нового робочого тіла. Так можна продовжувати і далі, поки цей потенціал не буде використано повністю. Більш того, при

високій початковій температурі циклу, і багатоступінчастої утилізації теплоти робочого тіла основного циклу, відкривається можливість утилізації теплоти робочого тіла додаткових циклів.

Характерною особливістю ряду комбінованих установок є використання води в якості робочого тіла в додатковому утилізаційному циклі, а, оскільки, вода може мати різні фазові стани, то в якості робочого тіла використовуються вода і водяна пара.

Установки з низькотемпературним циклом Ренкіна. Низькотемпературний цикл Ренкіна заснований на використанні низько-киплячих робочих тіл (НРТ) (пентан, бутан, фреони) і відповідної парової турбіни. ККД циклу становить 7...15 %.

Модернізація КС в цьому напрямку можлива завдяки наявності достатнього обсягу викидних теплоносіїв:

а) середнього потенціалу – вихідних газів ГТУ простого циклу при температурі 400...650 °С і ГТУ з регенерацією теплоти при температурі 270...320 °С, парогазових і газопарових установок при температурі вихідних газів після котла-утилізатора 120...200 °С;

б) низького потенціалу – охолоджуваних за допомогою різних технологічних пристроїв газів і рідин при температурі 12...35 °С (компримований газ, повітря, мастило та ін.).

Для вироблення електроенергії можуть бути використані різні схеми тепло утилізаційних енергоустановок на НРТ:

а) прості – тільки з утилізацією середньої потенційної теплоти газів, що відробили, від базового ГТД;

б) комплексні – з одночасною утилізацією теплоти середнього (гази, що виходять) і низького потенціалів. При цьому теплота низького потенціалу використовується для підігріву НРТ після конденсатора, а середнього потенціалу – для підігріву їх до стану сухої насиченої пари у випарнику НРТ.

в) з водяним або повітряним охолодженням конденсатора НРТ;

г) з додатковим підігрівом або охолодженням вихідних газів приводних двигунів перед їх подачею в теплообмінники тепло утилізаційних енергоустановок.

Як недоліки низькотемпературного циклу Ренкіна можна виділити наступні проблеми: пожежонебезпечність, вибухонебезпечність, робота установки під високим тиском, обмеження за умовами безпеки озонового шару, складність обслуговування, надмірно розвинена інфраструктура установки, висока ціна робочого тіла.

Установки на основі тригенераційних те-

хнологій. Під тригенерацією мається на увазі виробництво холоду на додаток до електричної (механічної) та теплової енергії (когенерації).

Необхідність застосування тригенераційних технологій утилізації теплоти вихідних газів до роботи ГТД обумовлена низкою причин. Однією з них є можливість зменшити несприятливий вплив високої температури зовнішнього повітря на ККД і потужність ГТД. Особливо це актуально в умовах жаркого клімату. Однак не менш важливим є застосування тригенерації для проміжного охолодження стисненого повітря у ГТД за допомогою холодильних машин, що використовують теплоту відхідних газів [8].

Завдяки високій температурі (120 ... 140 °С і вище) стиснене повітря є не тільки об'єктом охолодження, але і джерелом теплоти, яку доцільно використовувати в тепловикористовуючій холодильній машині (ТХМ) для виробництва холоду (5...10 °С). У ТХМ використовуються НРТ, що дозволяє утилізувати теплоту порівняно низького температурного рівня, наприклад, відхідних газів після утилізаційного пароводяного котла.

Відомі результати досліджень з охолодження повітря ГТД за допомогою повітряних турбокомпресорних холодильних машин [7]. Але ККД повітряних холодильних машин досить низький, а самі установки складні і громіздкі.

Таким чином, при комплексній утилізації з використанням виробленого в ТХМ холоду прирощення ККД становить: $\Delta\eta = 1,5...3,5$ % (при $t_{в1} = 140$ °С) і $\Delta\eta = 2,5...5,0$ % (при $t_{в1} = 180$ °С). Така температура повітря буде при оптимальному (відповідає максимальному збільшенню ККД в результаті проміжного охолодження повітря) співвідношенні ступенів підвищення тиску.

Висновки

Виконаний огляд та аналіз стану та перспектив розвитку ГТУ дає можливість зробити наступні висновки:

1. Найбільш простим напрямком підвищення ККД ГТУ для ГТС України є застосування ГТУ з підвищеною температурою горіння палива, що дає змогу підвищити цей показник ефективності ГТУ на 4 – 7 %.

2. Найпростішим і низьковитратним способом підвищення коефіцієнта використання енергії палива (КВП) є застосування регенераційно-утилізаційних технологій на викидному тракті ГТУ на основі використання залишкового теплового потенціалу викидних газів.

3. Доцільно більш широке застосування низько температурного циклу Ренкіна та тригенерації викидного тепла за умов наявності відповідних організаційно-технічних вимог.

4. Узагальнюючи вище викладене, визначе-

но найбільш доцільні наступні методи технічного вдосконалення газотурбінного устаткування вітчизняних ГТС:

4.1. Своєчасна заміна зношених та застарілих ГТУ на новітні більш потужніші і економічні агрегати.

4.2. Масове введення в експлуатацію на газоперекачувальних компресорних станціях сучасних приводів ГТУ з підвищеною температурою горіння.

4.3. Реконструкція існуючих та побудова нових ГТУ.

4.4. Широка модернізація КС, що працюють, та вдосконалення схем, що проектуються, з використанням циклу Ренкіна.

Комплексне, раціональне запровадження перелічених організаційно-технічних заходів дозволить підняти технічний і енергетичний рівень вітчизняної ГТС до сучасного світового науково-технічного рівня, забезпечити її безпосередній розвиток, відповідаючи вимогам стратегічного прогресу цієї важливої галузі народного господарства України.

Список використаних джерел

1. Христич В. А. Газотурбинные установки: история и перспективы / В. А. Христич, Г. Б. Варламов. – К.: НТУУ «КПИ», 2006. – 384 с.
2. Халатов А. А. Состояние и проблемы развития механического привода для ГТС Украины / А. А. Халатов, А. А. Долинский, Д. А. Костенко, В. П. Парафейник // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т. 32, № 1. – С. 44 – 53.

В. И. Милованов, д.т.н., А. Л. Клебан

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ УКРАИНЫ

В настоящее тяжелое для Украины экономическое время, как никогда, актуальна тематика нахождения перспективных направлений повышения качества и эффективности компрессорных станций. Поскольку именно компрессорная техника занимает значительную долю энергетического оборудования страны, то и направления повышения ее эффективности открывают перспективы более рационального использования энергии.

Ключевые слова: энергетика, качество, газовая турбина, компрессор, компрессорная станция.

V. Milovanov, DSc, O. Kleban

MAIN DIRECTIONS OF IMPROVING THE QUALITY AND EFFICIENCY OF UKRAINE GAS TRANSPORTATION SYSTEM

In the current difficult economic time for Ukraine one of the relevant subjects are perspective directions of improving the quality and efficiency of compressor stations. Since compressor stations takes a significant share of the country's power equipment, the directions for increasing its efficiency offers the prospect of a more rational using of the energy.

Keywords: power, quality, gas turbine, compressor, compressor station.

3. Блейхер И. Г. Компрессорные станции / И. Г. Блейхер, В. П. Лисхев. – М. – Киев: Машгиз, 1959. – 323 с.

4. Люта Н. В. Компаративний аналіз ефективності використання газотурбінного та електричного приводів газоперекачувальних агрегатів компресорних станцій магістральних газопроводів / Н. В. Люта, О. Я. Дубей, І. М. Ісаєва // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2013. – № 2(35) – С. 30 – 41.

5. Костюк А. Г. Газотурбинные установки: Учеб. пособие для вузов. / А. Г. Костюк, А. Н. Шерстюк – М.: «Высшая школа», 1979. – 254 с.

6. Нечаев Ю. Н. Теория авиационных двигателей. Ч. 2 / Ю. Н. Нечаев, Р. М. Федоров. – М.: «Машиностроение» – 1978. – 329 с.

7. Халатов А. А. Перспективы снижения выбросов теплоты за газотурбинными приводами украинской газотранспортной системы / А. А. Халатов, А. С. Коваленко // Промышленная теплотехника. – 2015. – № 2. – С. 48 – 58.

8. Халатов А. А. Анализ воздушного цикла утилизации теплоты горячих газов за газотурбинными приводами ГТС Украины / А. А. Халатов, С. Д. Северин, А. С. Коваленко, В. В. Бурлака // Промышленная теплотехника. – Т. 36, №. 4. – С. 18 – 26.

Надійшла до редакції 16.05.2017

Рецензент: д.т.н., проф., Дорошенко О. В.,
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса.