

КУЛИК М. П., канд. техн. наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ

ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

Анотація. Розглянуті джерела утворення та перелік шкідливих речовин, які викидаються у атмосферне повітря об'єктами газотранспортної системи. Показано, що парникові гази, оксиди азоту, вуглецю, а особливо метан з різних причин викидаються в атмосферу. Основний технологічне обладнання, в якому утворюється вказані шкідливі величини, є камера згорання газової турбіни, яка є складовою частиною газоперекачувального агрегату. Запропоновано подавати на спалювання природного газу атмосферне повітря, збагачене киснем, з використанням мембранних технологій

Ключові слова. Газотурбінна установка, відцентровий нагнітач, газомотокомпресор, оксиди азоту, парникові гази, атмосферне повітря, кисень, мембранні технології.

Abstract. Sources of formation and a list of harmful substances emitted into the atmosphere by gas transport system objects are considered. It is shown that greenhouse gases, nitrogen and carbon oxides, and especially methane are released into the atmosphere for various reasons. The main technological equipment where these harmful values are formed is a combustion chamber of a gas turbine, which is an integral part of a gas pumping unit. It is suggested to feed oxygen enriched atmospheric air for natural gas combustion using membrane technologies.

Keywords. Gas turbine unit, centrifugal blower, gas motor compressor, nitrogen oxides, greenhouse gases, atmospheric air, oxygen, membrane technologies.

Газотранспортна система (ГТС) України на сьогоднішній день є досить важливим об'єктом газового комплексу, який може забезпечити енергетичну незалежність держави та вносити в її бюджет відповідні грошові кошти. Газоперекачувальні агрегати (ГПА) компресорних станцій (КС) магістральних газопроводів та підзем-

них сховищ спроектовані, побудовані та тривалий час експлуатуються із можливим подвійним приводом газоперекачувального обладнання. На КС магістральних газопроводів використовують відцентрові нагнітачі (ВН) із електроприводом та з приводом від газотурбінних установок (ГТУ), а також поршневі газомотокомпресори. Газотурбінний привід порівняно із електроприводом має ряд переваг, які полягають у можливості регулювання режиму роботи нагнітача шляхом зміни швидкості обертання нагнітача. Чи не єдиним недоліком слід вважати значні витрати газу на запуск агрегата та суттєвий вплив[1,2] на навколишнє середовище.

При спалюванні газу в газовій турбіні ГПА викидається в навколишнє середовище (атмосферне повітря) відповідна кількість шкідливих речовин, зокрема парникових газів, серед основних слід вважати двоокис вуглецю CO_2 та закис азоту N_2O . А під час спалювання суміші природного газу та атмосферного повітря, в якому міститься майже 79 % вільного азоту, останній перетворюється на окис NO та двоокис NO_2 . Їхню суміш прийнято називати окислами азоту NO_x , а також її пов'язують з появою кислотних дощів, фотохімічних смогів, виснаженням і руйнуванням захисного озонового шару Землі.

Крім того, об'єкти ГТС викидають ще так звані «леткі гази», зокрема метан CH_4 , через негерметичність різноманітних газових комунікацій (технологічних і допоміжних), запірної і регулюючої арматури, яка насичена технологічною обв'язкою. Оцінка обсягів таких витоків надана в роботі [3], причому частка на процеси спалювання складає трохи менше 30 %.

Газовий спосіб генерації електричної енергії реалізується в традиційних газотурбінних установках (ГТУ) в склад яких входять повітряний компресор, камера згоряння і газова турбіна, а також допоміжні системи, що забезпечують її роботу. Вал газової турбіни може бути з'єднаний з будь-якими технологічними механізмами, зокрема із відцентровими нагнітачами. Сукупність ГТУ і електричного генератора називають зазвичай газотурбінним агрегатом. Спрощена принципова схема такої ГТУ показана на рис. 1, запозичена із книги 3 колективної монографії [4].

Атмосферне повітря поступає на вхід компресора, що виконаний у вигляді роторної турбомашини з обертливими та нерухомими лопатками. Відношення тиску за компресором p_b до тиску атмосферного повітря перед ним p_a називають ступенем стискування повітряного компресора і позначають як $\Pi = p_b / p_a$. Ротор

компресора приводиться в рух газовою турбіною. Потік стисненого повітря подається в одну або дві і більше камер згорання. При цьому потік стисненого повітря від компресора здебільшого розділяється на два потоки.

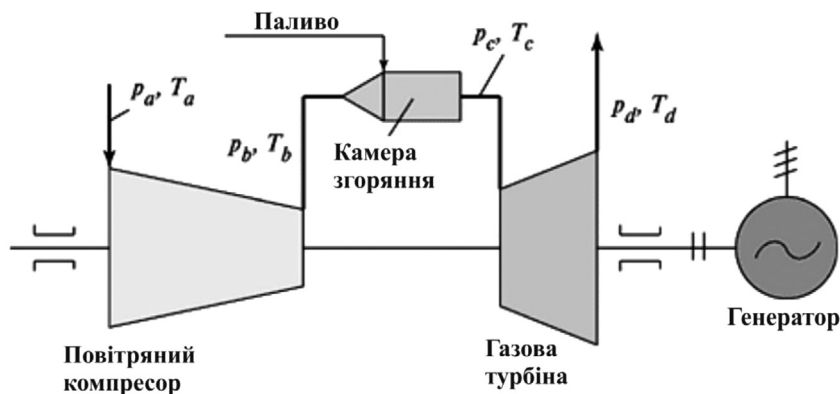


Рис. 1. Принципова схема газотурбінної установки

Перший потік направляється до пальникових пристроїв, куди також поступає паливо (газове або рідке). При спалюванні утворюються продукти згорання високої температури, до них підмішується відносно холодне повітря для отримання робочого газу з допустимою для деталей газової турбіни температурою.

Температура газів за ГТУ досить висока, і значна кількість теплоти, отриманої при спалюванні палива, у прямому розумінні, вилітає в димову трубу. Тому в автономному режимі роботи ГТУ її коефіцієнт корисної дії досить низький.

Ситуація кардинальним чином змінюється при встановленні на «вихлопі» ГТУ теплообмінника (регенератора, мереженого підігрівника або котла – утилізатора для комбінованого циклу).

Ідея створення комбінованих парогазових установок, які використовують продукти згорання палива та водяну пару, як робоче середовище, вперше була озвучена французьким вченим Саді Карно на початку XIX століття. Карно запропонував схему поршневої парогазової установки і обґрунтував головну умову створення ефективної парогазової установки – використання продуктів спалювання в газовій турбіні з одночасною утилізацією теплоти відхідних газів для отримання водяної пари робочих параметрів

для парової турбіни. З часом після по мірі розвитку парових та газових турбін вдалося практично реалізувати цю геніальну ідею.

Парогазові установки первісно розраховані на роботу на газоподібному паливі через наявність в їх складі газової турбіни. У той же час через істотні переваги ГПУ перед іншими видами енергетичних установок виникла потреба використання парогазових технологій в енергоустановках, які працюють на твердому паливі. Це вкрай важливо для умов України при обмежених запасах нафти і газу та великих запасах вугілля.

Разом з тим, ще в 40–50 роки минулого століття німецькими інженерами (див. патент ФРГ № 839290, 1944 р.), була запропонована принципова схема паросилової енергетичної установок, для роботи газової частини якої використовується традиційне тверде паливо, зокрема очищені димові гази. При цьому лопатки газової турбіни працюють у важких умовах через наявність в гарячих продуктах згорання твердих включень та інших агресивних компонентів. Для усунення таких недоліків потрібно використовувати проміжне робоче середовище.

Теплова схема та цикл парогазової установки залежить від її виду. Парогазові установки є одним із видів більш широкої групи комбінованих установок із паровими та газовими турбінами, при цьому важливе значення для ефективного їх функціонування мають внутрішні зв'язки між газовим та паровим циклами, які можуть по своїй структурі змінними. Класифікація комбінованих енергетичних установок зроблена Інститутом технічної теплофізики НАН України.

Комбіновані парогазові енергетичні установки бувають бінарними та монарними, тобто із окремими та змішаними контурами циркуляції робочого тіла — водяної пари та газу. Комбіновані установки з роздільними контурами робочих тіл виконуються з котлом-утилізатором, або з парогенератором. В установках з котлом — утилізатором більша частка потужності виробляється в газовому контурі. Витрата палива в таких установках в основному припадає на газовий контур, в якому коефіцієнт надлишку повітря зазвичай в діапазоні 1.3–2.5, тому для стискування надлишкового повітря витрачається значна частка роботи турбіни. Ці затрати можна зменшити, якщо зменшити коефіцієнт надлишку повітря, що досягається за рахунок введення додаткового робочого тіла, яке потребує значно менших затрат на його стискування. Роль такого робочого тіла з успіхом відіграє водяна пара. При цьому відносна

витрата введеного середовища може сягати 50–60 % витрати повітря. Відповідно збільшується потужність ГТУ та росте її к.к.д.

Газопарові установки поділяються на установки із вприскуванням пари (STIG) і на установки із вприскуванням в газовий тракт води або пароводяної суміші (НАТ І СНАТ). В першому випадку пара, яка генерується в котлі-утилізаторі вводиться в тракт високого тиску після компресора(в камеру згоряння). В другому випадку вода або пароводяна суміш випаровується в тракті високого тиску, як до, так і після камери. В обох випадках водяна пара разом із відхідними газами викидається в атмосферу, що приводить до втрат теплоти випаровування води так і самої води.

В установках «Водолій» [5] цей недолік усунутий вводом контактного конденсатора, в якому конденсується відпрацьована водяна пара, а сама вода знову повертається в процес.

Принципова схема згаданої установки приведена на рис. 2.

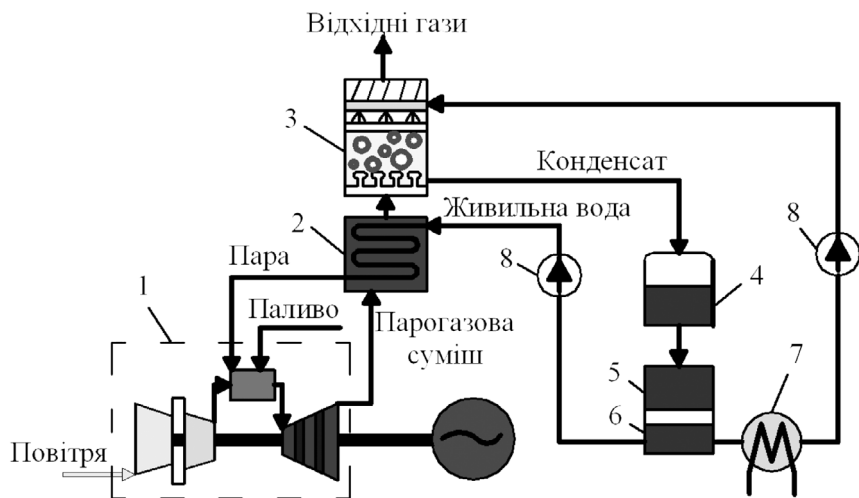


Рис. 2. Принципова теплова схема контактної газопарової установки «Водолій»

- 1 – газотурбінний двигун, 2 – паровий котел-утилізатор,
- 3 – контактний конденсатор, 4 – збірник конденсату,
- 5 – блок очистки конденсату, 6 – витратний бак живильної води,
- 7 – охолоджувач води, 8 – насос живильної води

Установка включає вдосконалений серійний газотурбінний двигун ГТД ДС-90, утилізаційний парогенератор КУП-3100,

контактний конденсатор КК-90, систему охолодження води, що подається в контактний конденсатор. На експериментальному стенді було досягнуто значення к.к.д в діапазоні 40–41 %, а викиди оксидів азоту NO_x та оксиду вуглецю не перевищували 50 мг/нм³. У 1995 році в Україні підприємством ДП НВКГ «Зоря»–«Машпроект» була пущена в дію випробувальна повнорозмірна контактна газопаротурбінна установка «Водолій-25» потужністю 25 МВт.

Проведені розрахунки [5] показують, що у перспективних установках типу «Водолій» можливе отримання загального к.к.д. в діапазоні 55–57 %. Одночасно при цьому потужність ГТД можна збільшити на 30–60 %, а економія палива може складати 20–25 %. На цьому перспектива вдосконалювання такого типу установок не може завершуватися.

Одним із найважливіших факторів, який визначає ефективність спалювання органічного палива (твердого, рідкого чи газоподібного) є виключення атмосферного азоту від участі в процесі згорання [6]. Таке виключення тягне за собою, при збільшенні в паливо-повітряній суміші вмісту окислювача (збагаченого киснем (до 40 %) атмосферного повітря), відмову від використання коефіцієнта надлишку повітря. А це означає скорочення об'єму димових газів, одночасно із зменшення концентрації оксидів азоту, а також суттєве скорочення валових викидів в часовому форматі (т/рік). Це приводить не тільки до підвищення рівня екологічної безпеки, але і до зменшення нарахувань за викиди шкідливих речовин в атмосферне повітря.

Слід зауважити, що реакція утворення оксидів азоту відноситься до ендотермічних процесів, що передбачає більш високу температуру горіння, що не може не вплинути на збільшення коефіцієнта корисної дії. Вказана пропозиція в час її озвучення у виступі на профільній конференції [6] у Дніпропетровському н/д екологічному інституті виглядала майже фантастичною, сьогодні стає реальністю, та має значні перспективи завдяки розвитку мембранних технологій [7]. Для переводу ГТУ «Водолій» на спалювання газотурбінного палива з використанням збагаченого киснем атмосферного повітря необхідно на лінії стиснутого повітря від компресора до камери спалювання вставити мембранний модуль потрібної продуктивності та концентрації, відповідно до діаграми приведеної на рис. 3.

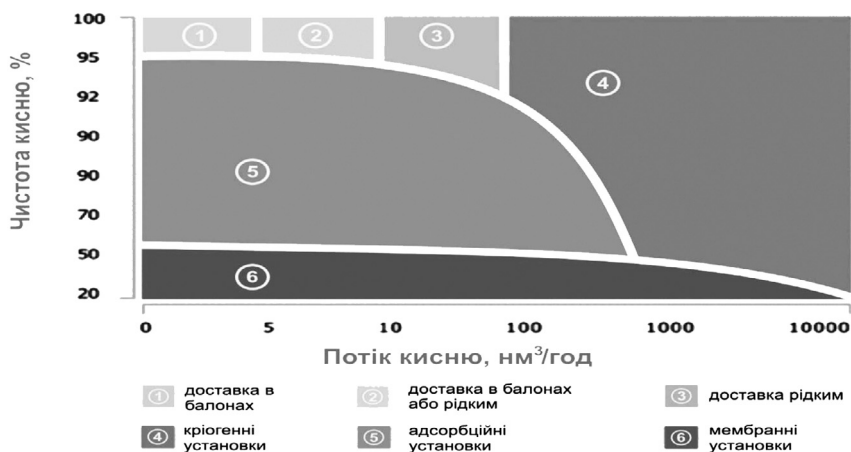


Рис. 3. Якісна характеристика процесу отримання кисню розділенням повітря за допомогою розглянутих технологій та способів доставки споживачу

Застосування кисню під час спалювання має такі переваги: високу концентрацію теплової потужності, високу температуру горіння, невеликий у порівнянні із горіння у повітрі об'єм продуктів спалювання, а отже і менші втрати тепла із відхідними газами, збільшення теплового потоку внаслідок підвищення концентрації в продуктах горіння випромінюючих триатомних газів, турбулізацію потоку продуктів горіння, що збільшує тепловіддачу конвекцією, рекомбінацію дисоційованих продуктів згорання на поверхні, що нагрівається з передачею їй значної частини прихованої теплоти рекомбінації в технологіях прямого спалювання газокисневим полум'ям [8]. В роботі [9] приведені залежності температури горіння від концентрації кисню при спалюванні природного газу в суміші із атмосферного повітря, збагаченого киснем. З наведеної там графічної залежності витікає, що найбільше зростання температури горіння відбувається за концентрації кисню до 50 %, при більш високих значеннях концентрацій ріст температури сповільнюється по причині збільшення затрат теплоти на дисоціацію продуктів горіння.

Вищеприведені дані дуже добре узгоджуються із порівняльними характеристиками, приведеними на рис. 3 для мембранних технологій, для необхідної продуктивності до 3–4 тисячі нм³/год., що досить добре узгоджується для концентрацій по кисню до 40 %.

Однак, висока температура середовища при неправильному використанні кисню може привести до певних перегрівів та руйнувань технологічного обладнання, яке може бути малопридатним для роботи при високих температурах. Але температуру 2600–2800°C сучасне обладнання може забезпечити, а такий температурний діапазон вказує на можливість у найближчому майбутньому забезпечити перехід на рівень 3000°C може бути прийнятним для МГД-генерації.

Таким чином, модернізація газотурбінних установок шляхом переведення їх на спалювання газотурбінного палива з використанням атмосферного повітря збагаченого киснем (при концентрації до 40 %) може гарантувати досягнення ряду технологічних, екологічних переваг, що в кінцевому результаті позитивно відіб'ється не тільки на енергоощадності.

Література

1. Стан і перспективи розвитку нафтогазового комплексу України / за ред. Івченка О. Г. Київ: Наукова думка, 2006. — 310 с.
 2. Лещенко І. Ч. Програмно-інформаційний комплекс управління функціонуванням компресорних станцій магістральних газопроводів для зменшення витрат паливного газу. Проблеми нафтогазової промисловості. 2009. — Вип. 7. — С. 195–205.
 3. Лещенко І. Ч. Впровадження сучасних технологій у газотранспортній системі України для зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу. / І. Ч. Лещенко// Проблеми загальної енергетики. 2010. — Вип. 3(23). — С. 41–47.
 4. Бондаренко В. И., Варламов Г. Б., Вольчин И. А. Энергетика. История, настоящее и будущее. От огня и воды к электричеству / Научное редактирование Карп И. Н., Ландау Ю. Н. Сигал И. Я., — Киев, ООО «Новый друк». 2011. Кн. 3. — 398 с.
 5. Дикий. Н. А., Соломаха А. С., Суздальская Е. И. Газотурбинная технология «Водолей» для совместного производства электрической и тепловой энергии. / Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2012. — № 3. — С. 30–33.
 6. Гринченко Д. Н., Кулик М. П. Перспективы создания экологически чистых электростанций.
- Тезисы докладов Республиканской н.т конференции «Проблемы и опыт охраны окружающей среды». Днепропетровск, 1990. — С. 67–69.

7. Кулик М. П., Кравець Т. Ю., Семерак М. М. Аналіз наявних технологій розділення повітря для підвищення ефективності спалювання палива в теплоенергетиці. Науково-технічний журнал «Екологічні науки». — 2018, № 2(21), с. 59–64.

8. Шпильрайн Э. Э. Введение в водородную энергетику. — М.: Энергоатомиздат. — 1984. — 264 с.

9. Водородные энергетические технологии. Материалы семинара лаборатории ВЭТ ОИВТ РАН.:сб. научных трудов. М.: ОИВТ РАН, 2017. — Вып. 1. — 190 с.

Інформація про автора: Кулик М. П., канд. техн. наук, доцент.
E-mail: m_p_kulik@ukr.net: +38(050)337-74-37.