

ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ГАЗОТУРБІННОГО ПРИВОДУ ГАЗОПЕРЕКАЧУЮЧИХ АГРЕГАТІВ

Кулик М.П.¹, Павлюк Л.І.², Козак Л.Ю.²

¹Товариство з обмеженою відповідальністю «Євроекоскоп»
вул. Антоновича, 123А, 79029, м. Львів

²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська 15, 76019, м. Івано-Франківськ

Важливою ознакою незалежності будь-якої держави є її енергетична безпека, складовою частиною якої вважається також і екологічна безпека потенційно небезпечних об'єктів та технологічних процесів. До таких об'єктів належать об'єкти нафтогазової галузі, зокрема об'єкти газотранспортної системи (ГТС) України. В роботі розглянуті джерела утворення та перелік шкідливих речовин, які викидаються у атмосферне повітря об'єктами газотранспортної системи, а саме компресорні станції (КС) лінійної частини ГТС та підземних сховищ природного газу. Показано, що екологічна небезпека таких об'єктів суттєво зростає у випадку роботи КС на газотурбінному приводі.

А до переліку шкідливих речовин, які викидаються в атмосферне повітря, відносяться метан, як основна складова природного газу, а також оксиди азоту та вуглецю, що з різних причин викидаються в атмосферу. Деякі леткі шкідливі інгредієнти із згаданого переліку належать до парникових газів, які не тільки руйнують озоновий шар атмосфери, а і приводять до появи кислотних дощів. Основним технологічним обладнанням, в якому утворюється вказані шкідливі речовини, є камера згорання газової турбіни, як складова частина газо-перекачувального агрегату. Пропонується подавати на спалювання природного газу атмосферне повітря, збагачене киснем. Проведений аналіз наявних методів збагачення, та підтверджено аналітичним способом, що найбільш доцільно прим цьому використання мембранних технологій.

Використання повітря, збагаченого киснем, окрім чисто екологічного ефекту приводить, як витікає із матеріалів статті, до техніко-економічної вигоди. До таких переваг відноситься підвищення температури в зоні горіння, через зниження частки вільного азоту, а значить і зниження утворення оксидів азоту, реакція утворення яких є ендотермічною. Це приводить навіть до зменшення кількості природного газу для використання на власні потреби, а також до зниження енергетичних затрат на привід вентиляційного обладнання для продуктів спалювання. Також слід очікувати позитивних покращень і в плані декарбонізації виробництва. *Ключові слова:* газотурбінна установка, відцентровий нагнітач, газомотокомпресор, оксиди азоту, парникові гази, атмосферне повітря, кисень, мембранні технології, декарбонізація.

Increasing environmental safety of gas turbine drive of gas pumping units. Kulyk M., Pavliuk L., Kozak L.

An important sign of the independence of any state is its energy security, part of which is also considered to be the environmental security of potentially dangerous objects and technological processes. Such facilities include oil and gas industry, in particular gas transmission system (GTS) of Ukraine. The paper considers sources of formation and a list of harmful substances emitted into the atmosphere by the gas transmission system objects, namely compressor stations (CS) of the linear part of the GTS and underground natural gas storage facilities. It is shown that environmental hazard of such facilities significantly increases in case compressor stations operation is gas turbine driven.

The list of harmful substances emitted into the atmosphere includes methane, as the main component of natural gas, as well as nitrogen and carbon oxides, which are emitted into the atmosphere for various reasons. Some volatile harmful ingredients from this list are greenhouse gases, which not only destroy atmosphere ozone layer, but also lead to acid rain. The main technological equipment in which these harmful substances are formed is a gas turbine combustion chamber, which is an integral part of the gas pumping unit. It is proposed to supply oxygen enriched atmospheric air for natural gas combustion. The analysis of available methods of enrichment is carried out, and it is confirmed by an analytical way that use of membrane technologies is the most advisable.

The use of oxygen enriched air, in addition to the purely environmental effect, leads, as the article suggests, to technical and economic benefits. Such advantages include an increase in temperature in the combustion zone, due to a decrease of free nitrogen ratio, and hence a decreased formation of nitrogen oxides, the formation of which is endothermic. This even leads to a reduction of the amount of natural gas for own use, as well as a reduction in energy costs for the operation of ventilation equipment for combustion products. Positive steps should also be expected in terms of production decarbonization. *Key words:* gas turbine unit, centrifugal supercharger, gas motor compressor, nitrogen oxides, greenhouse gases, atmospheric air, oxygen, membrane technologies, decarbonization.

Вступ. 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 підземних сховищ спроектовані, побудовані та тривалий час експлуатуються із можливим подвійним приводом газоперекачуваль-

ного 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 простішого 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 в навколишнє середовище, а саме в атмосферне повітря, викидається певна кількість шкідливих речовин, в тому числі парникових газів, серед яких необхідно виділити 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 її пов'язують також з появою кислотних дощів, фотохімічних смогів, виснаженням і руйнуванням захисного озонового шару Землі. Доцільно зауважити ще, що хімічна реакція утворення оксидів азоту є ендотермічною, що приводить до зниження температури димових газів та зменшення коефіцієнта корисної дії газової турбіни.

Крім того, об'єкти ГТС викидають ще так звані «леткі гази» через негерметичність різноманітних газових комунікацій, як технологічних, так і допоміжних, а також запірної та регулюючої арматури, яка насичена технологічною обв'язкою. Серед таких шкідливих інгредієнтів виділяється основний цінний газ – метан CH_4 . Оцінка обсягів таких витоків приведена в роботі [3], причому частка на продукти спалювання складає, в загальному обсязі, лежить в межах 30 %.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій. В склад традиційної ГТУ входять повітряний компресор, камера згоряння і газова турбіна, а також допоміжні системи, що забезпечують її роботу. Така ГТУ може використовуватися як для приводу ГПА, так і для виробництва додаткової електричної енергії. 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 обертовими 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 згоряння. При цьому потік стисненого повітря від компресора здебільшого розділяється на два потоки.

Потік стиснутого повітря направляється до паликових пристроїв, куди також поступає паливо (газове або рідке). При спалюванні утворюються продукти згоряння високої температури, до них підмішується відносно холодне повітря для отримання

робочого газу з допустимою для деталей газової турбіни температурою.

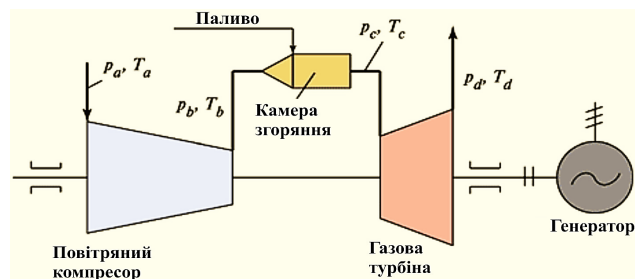


Рис. 1. Принципова схема газотурбінної установки

Температура газів після 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 для генерації електричної енергії, які використовують продукти згоряння 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 ГТУ перед іншими видами енергетичних установок проявляються у випадку, коли в енергетичних установках використовують тверде паливо. Це вкрай важливо для умов України при обмежених запасах нафти і газу та великих запасах вугілля, а також і для інших держав зі схожими природними умовами.

Разом з тим, ще в 50-і 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 згоряння 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 розділними 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 введенного 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).

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).

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 установках типу «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.

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

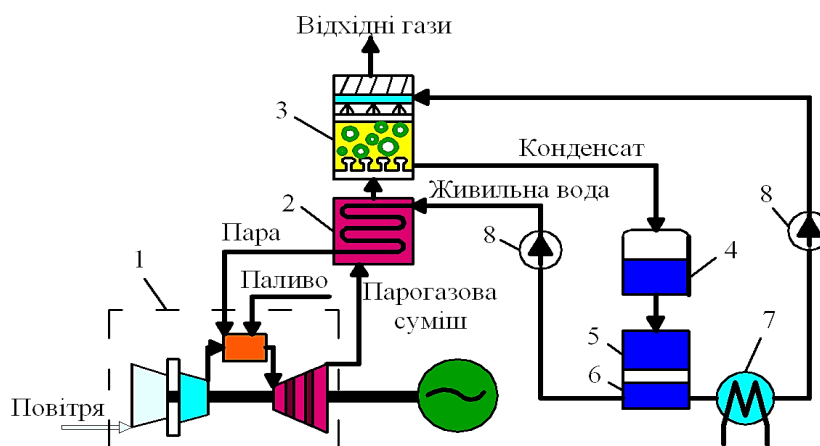


Рис. 2. Принципова теплова схема контактної газопарової установки «Водолій»
1 – газотурбінний двигун, 2 – паровий котел-утилізатор,
3 – контактний конденсатор, 4 – збірник конденсату,
5 – блок очистки конденсату, 6 – витратний бак живильної води,
7 – охолоджувач води, 8 – насос подачі живильної води

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 нашу думку, на цьому перспектива вдосконалювання. На нашу думку, на цьому перспектива вдосконалювання такого типу установок ще зовсім не вичерпана.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми. 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 окислів 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 впливає на зниження температури продуктів згорання, що не може не вплинути на зниження коефіцієнта корисної дії.

Вказана пропозиція в час її першого озвучення у виступі на профільній конференції [6] у Дніпропетровському науково-дослідному екологічному інституті виглядала майже фантастичною, а сьогодні вже стає реальністю, та має значні перспективи завдяки розвитку мембранних технологій [7].

Для переведу 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.

Застосування кисню під час спалювання має такі переваги: високу концентрацію теплової потужності, високу температуру горіння, невеликий у порівнянні із горінням 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 в технологіях прямого спалювання газокисневим полум'ям [8]. В роботі [9] приведені залежності температури горіння від концентрації кисню при спалюванні природного газу в середовищі атмосферного повітря, збагаченого киснем. З наведеної там графічної залежності витікає, що найбільше зростання температури горіння відбувається за концентрації кисню до 40 %, при більш високих значеннях концентрацій ріст температури сповільнюється по причині збільшення затрат теплоти на дисоціацію продуктів горіння.

Методи утворення шкідливих речовин, що утворюються при спалюванні органічного (твердого, рідкого та газоподібного) палива, в тому числі і найбільш небезпечних компонентів – до яких по своїй

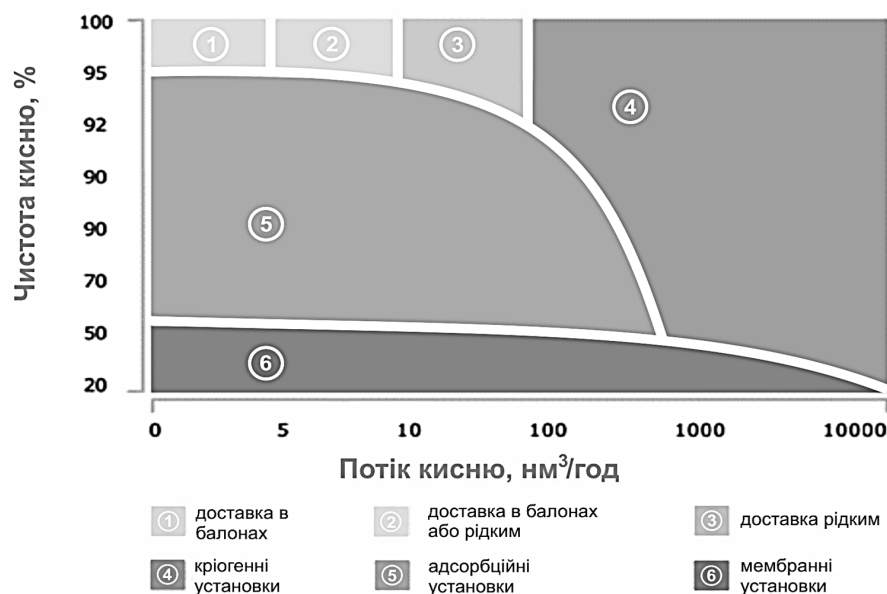


Рис. 3. Якісна характеристика процесу отримання кисню розділенням повітря за допомогою розглянутих технологій та способів доставки споживачу

токсичності, слід віднести різні оксиди азоту, приведені в фундаментальній роботі [10].

Формулювання цілей статті. Метою даної роботи є аналітичні дослідження переваг використання збагаченого киснем атмосферного повітря при спалюванні природного газу в газотурбінних установках, як при його транспортуванні, а також на підприємствах теплопостачання для обслуговування промислових та побутових споживачів.

Висвітлення основного матеріалу дослідження.

Для виявлення якісних та кількісних параметрів процесу спалювання природного газу в газовій установці “Водолій” з газовою турбіною потужністю 25 МВт необхідно провести орієнтовні розрахунки об’ємів природного газу, димових газів, включаючи сумарну кількість оксидів азоту NO_x (в тому і оксид азоту N_2O) з використанням при цьому атмосферного повітря із звичайним вмістом кисню на рівні приблизно 20,9 % за об’ємом. Крім того, такі розрахунки слід також провести для випадку спалювання в атмосферному повітря, збагаченому киснем до рівня 30 і 40 %, що досить легко досягається мембранними методами, як видно із графіка на рис. 3.

Газова турбіна вказаної потужності споживає протягом однієї секунди $g_i = 2.5125 \text{ м}^3/\text{с}$ природного газу (див. технічний паспорт). Річна витрата X_2 природного газу з врахуванням часу роботи близько $T_p = 8000 \text{ год/рік}$

$$X_2 = g_i \cdot T_p = 2.5125 \cdot 8000 \cdot 3600 = 72\,360\,000 \text{ м}^3/\text{рік}.$$

Витрата палива за рік B в тонах з врахування його густини $\rho = 0.723 \text{ кг/м}^3$ визначається за допомогою наступного виразу $B = X_2 \cdot \rho$, що після підстановки конкретних значень множників приведе до $B = 72\,360\,000 \cdot 0.723 = 52\,316\,280 \text{ кг} \approx 52\,316.3 \text{ т}$.

Відомі науковій спільноті методики визначення обсягів відхідних (димових) газів та кількісний склад продуктів спалювання приведені в різноманітній технічній літературі, зокрема в [10, 11], є досить складними та потребують знання не тільки теплофізичних характеристик компонентів природного газу та атмосферного повітря (як окислювача). На вказані обсяги викидів шкідливих речовин (крім відхідних газів, нас цікавитиме вміст оксиду NO та діоксиду NO_2 азоту) суттєво впливають режимні характеристики процесу спалювання. Основним і досить важливим із їхнього числа є коефіцієнт надлишку α повітря, який визначається відношенням дійсної кількості окислювача до теоретично необхідної кількості згідно із стехіометричним рівнянням, та характеризує якість горючої суміші. Для спрощення в подальшому наших розрахунків приймемо $\alpha = 1$, оскільки вказаний коефіцієнт не може вважатися інформативним для вибраної нами мети дослідження.

Для підтвердження наших припущень, стосовно ефективності зменшення викидів оксидів

азоту при спалювання природного газу в суміші із атмосферним повітрям, збагаченого киснем, наведемо нескладні розрахунки з використанням методики [11] ГКД 34.02.305-2002 «Викиди забруднювальних речовин в атмосферу від енергетичних установок», яка затверджена Мінекології та природних ресурсів і Міністерством палива та енергетики України. Цей керівний нормативний документ, рекомендований для використання при заповненні річної статистичної звітності за ф. № 2-ТП (повітря) з метою визначення емісії забруднювальних речовин з врахуванням робочої теплоти згорання палива. Кінцеві результати таких розрахунків використовуються для обчислення розмірів платежів в державний та місцевий бюджети суб’єктами господарювання згідно Податкового Кодексу України.

Із описаних в роботах [10, 11] та широко відомих наявних методиках розрахунку обсягів викидів забруднювальних речовин, які надходять в атмосферне повітря з відхідними газами від енергетичної установки, використаєм методику, рекомендовану Мінпаливенерго та погоджену із Міністерством екології та природних ресурсів. Рекомендована спрощена методика базується на використанні виразу

$$E_j = 10^{-6} k_j B_i Q_i^r (1)$$

в якому:

E_j – валовий викид j -забруднювальної речовини за певний період часу, т;

K_j – показник емісії j -забруднювальної речовини при спалюванні i -палива, г/ГДж;

B_i – витрата палива за звітний період, т;

Q_i^r – нижча робоча теплота згорання i -палива, МДж/кг

Вираз (1) містить три змінні величини, з яких найбільшою невизначеністю характеризується нижча теплотворна здатність газоподібного палива. Така характеристика природного газу, як і інших горючих газів, змінюється внаслідок впливу як контрольованих, так і випадкових факторів.

Відомий лабораторний метод визначення теплоти згорання [12], суть якого полягає у повному згорянні визначеної кількості газу в атмосфері стиснутого кисню у герметично закритій металевій посудині – калориметричній бомбі. Її розміщують в калориметричній термостат, заповненим певною кількістю води. По величині збільшені температури води розрахунковим способом встановлюють кількість тепла, яке виділилось при спалюванні горючого (природного, попутного чи будь-якого іншого). А додаткову енергію утворення водних розчинів азотної і сірчаної кислот визначають відомими методами хімічного аналізу.

Якщо теплотворна здатність газоподібного палива невідома, то її можна розрахувати при допомозі емпіричної формули, яку запропонував Д. І. Менделєєв. Для цього необхідно знати елементарний склад палива та теплотворну здатність кож-

ного компонента, що є характерним для природного газу чи будь-яких горючих газових сумішей. Автори роботи [13] стверджують, що похибка таких розрахунків по вказаній методиці не буде перевищувати 10 % відн.

Склад природного газу не є стабільним, та змінюється в досить широких межах в залежності від родовища, режиму та надійної роботи установок попередньої підготовки газу (УППГ) і комплексної підготовки (УКПГ), умов зберігання в підземних сховищах (ПСГ) газу. Характерний склад природних газів і значення вищої та нижчої теплоти згорання конкретних компонентів за нормальних умов (абсолютному тиску $P_c = 101,315$ кПа і абсолютній температурі $T_c = 293,15$ °К) приведені в фундаментальній роботі [14]. Для визначення та підрахунку потреби в паливі, коефіцієнта корисої дії установки та складання теплового балансу використовують нижчу теплоту згорання. В нижче приведеній таблиці 1 подані усереднені кількісні та якісні характеристики природного газу.

Таблиця 1
Склад природного газу та нижча
теплота згорання його компонентів

Характеристика	Метан (CH ₄)	Етан (C ₂ H ₆)	Пропан (C ₃ H ₈)	Бутан (C ₄ H ₁₀)	Пентан (C ₅ H ₁₂)	Сума (N ₂ , CO ₂)
Частка (%)	93.5	2.8	1.7	0.9	0.4	0.7
Нижча теплота Q_{ir} (МДж/м ³)	35.88	64.36	93.18	123.18	161.36	–

Відповідно до формули Д. І. Менделєєва сумарна нижча теплота згорання природного газу визначається за виразом $Q_{сум.} = \sum Q_i^r \cdot k_i$, де k_i – відносна частка i -ої компоненти,

$$Q_{сум.} = 35,88 \cdot 0,935 + 64,36 \cdot 0,028 + 93,18 \cdot 0,017 + 123,18 \cdot 0,009 + 161,36 \cdot 0,004 = 38,687 \text{ (МДж/м}^3\text{)}$$

З врахуванням густини природного газу ($\rho_g = 0,723$ кг/м³) теплотворна масова здатність природного газу 27,97 МДж/кг.

Кількість необхідного атмосферного повітря для згорання 1 м³ природного газу при звичайній концентрації кисню (приблизно 21 %) визначається [15, с. 194–196] при допомозі нижче приведеного стехіометричного рівняння

$$V_o = [(0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum(n + m/4)C_nH_m - O_2)] / 21. (2)$$

Враховуючи реальний склад природного газу, приведеного в таблиці 1, а також зважаючи на те, що при його видобутку на реальному родовищі працюють установки попередньої (УППГ) чи комплексної (УКПГ) підготовки газу для подальшого транспортування до місця використання чи збері-

гання. В результаті такої процедури із газової суміші видаляються шкідливі домішки та залишаються, як видно із таблиці, горючі компоненти, вираз (2) дещо спрощується

$$V_o = (2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10} + 8C_5H_{12}) / 21 \quad (3)$$

а після підстановки у вираз (3) конкретних величин із таблиці 1 отримаємо реальне значення об'єму атмосферного повітря, що необхідно подати в камеру згорання ГТУ для спалювання 1 м³ природного газу при звичайній кон-центрації (≈ 21 %) кисню в атмосферному повітрі – $V_o = 10,21$ м³.

Об'єм діоксиду вуглецю визначається згідно наступного формульного виразу

$$V_{CO_2} = 0,01(CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 5C_5H_{12}) \quad (4)$$

що після підстановки відповідних значень із таблиці 1 приведе до $V_{CO_2} = 1,02$ м³/м³.

Частка азоту в продуктах згорання одиничного об'єму природного газу, при умові, що коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1$ визначається у відповідності до наступного виразу

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot \alpha \cdot V_o + 0,01 \cdot N_2 = 0,79 \cdot 10,21 + 0,01 \cdot 0,007 = 8,066 \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (5)$$

Об'єм водяної пари в продуктах згорання того ж об'єму природного газу визначають за виразом

$$V_{H_2O} = 0,5(4 \cdot CH_4 + 6 \cdot C_2H_6 + 8 \cdot C_3H_8 + 10 \cdot C_4H_{10} + 12 \cdot C_5H_{12}) = 0,5(4 \cdot 0,35 + 6 \cdot 0,028 + 8 \cdot 0,017 + 10 \cdot 0,009 + 12 \cdot 0,004) = 2,09 \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (6)$$

а об'єм всіх відхідних газів при спалюванні 1 м³ природного газу після сумачії всіх трьох складових $V_{сум} = 1,02 + 8,07 + 2,09 = 11,18$ м³.

Виходячи із реальних можливостей мембранних технологій збагачення атмосферного повітря киснем, необхідного для спалювання горючої газової суміші (природного газу), виберемо для подальших порівняльних розрахунків наступні значення концентрації кисню (див. графік на рис. 3) – а саме, крім загально прийнятого вмісту, ще значення 30 і 40 % об. Такі значення забезпечуються одним мембранним модулем в області витрат до 1000 нм³/год. Підбір необхідної витрати окислювача забезпечується певною кількістю модулів в батареї, що вибирається нескладним розрахунком. Таким чином усуваються всі обмеження по вказаному параметру.

Аналогічно до виразу (3) необхідна кількість повітря з відповідним вмістом кисню для спалювання 1 м³ природного газу визначається при концентрації кисню у атмосферному повітрі в 30 % згідного наступного виразу

$$V_o = (2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10} + 8C_5H_{12}) / 30. \quad (7)$$

Після нескладних обчислень отримуємо 7,145 м³ збагаченого киснем до 30 % атмосферного повітря на 1 куб. метр природного газу для його повного згорання. А при вмісту кисні у збагаченому атмосфер-

ному повітрі до 40 % для обчислення його кількості вираз (7) буде у знаменнику мати значення 40 % замість 30 % об'ємних.

$$V'_o = (2C_4H_{10} + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10} + 8C_5H_{12}) / 40. \quad (8)$$

З цього витікає, що для спалювання 1 м³ природного газу за відсутності коефіцієнта надлишку повітря потрібно всього $V''_o = 5,359$ м³ збагаченого киснем атмосферного повітря. Підсумовуючи вищевикладене слід акцентувати увагу, що при збільшенні кисню у збагаченому атмосферному повітрі від 21 %, потім до 30 % та в кінці до його концентрації 40 % потреба окислювача буде змінюватися відповідно – від 10,21 м³, через 7,145 м³ до 5,36 м³, тобто падає дещо більше ніж у два рази.

Що стосується об'ємів продуктів горіння, то частка діоксиду вуглецю та водяної пари при збільшенні вмісту кисню не буде змінюватися, а зменшиться тільки частка вільного азоту у димових газах відповідно до збільшення вмісту кисню.

Крім того, об'єм відхідних (димових) газів пропорційно знизиться також, що приведе до зниження енергетичних затрат на привід димовідвідних вентиляторів.

Окремо проведемо розрахунок утворення оксидів азоту, оскільки ці гази по шкідливій дії на навколишнє середовище характеризується найбільшою токсичністю.

Рекомендована [11] методика розрахунку сумарних обсягів викиду оксидів азоту (NO_x та N₂O) з використанням показників емісії ($k_{NO_x} = 64,311$ г/ГДж та $k_{N_2O} = 0,1$ г/ГДж) відповідно виразу (1) при використанні в процесі спалювання атмосферного повітря без збагачення його киснем, а також округливши розрахункову теплотворну здатність природного газу на рівні $Q_i^r = 27,97$ МДж/кг (ГДж/т) до значення 28 тої ж розмірності дозволяє отримати наступні обсяги викидів оксидів азоту

$$\begin{aligned} E_{NO_x} &= 10^{-6} \cdot k_{NO_x} \cdot Q_i^r \cdot B = \\ &= 10^{-6} \cdot 64,311 \cdot 28 \cdot 52316 = 94,21 \text{ т.} \\ E_{N_2O} &= 10^{-6} \cdot k_{N_2O} \cdot Q_i^r \cdot B = \\ &= 10^{-6} \cdot 0,1 \cdot 28 \cdot 52316 = 0,1465 \text{ т.} \end{aligned}$$

Таким чином, для конкретної газотурбінної установки типу «Водолій» потужністю 25 МВт, яка на протязі року може використати для роботи 72,316 млн м³/рік, що рівнозначно 52,316 тис. тон природного газу викидає тільки оксидів азоту 94,36 тон.

В зв'язку з тим, при спалюванні природного газу в атмосферному повітрі, збагаченому киснем до 40 %, а це забезпечується певним набором мембранних модулів, в реакційній суміші суттєво падає парціальний тиск атмосферного азоту. Тобто значно зменшується об'єм сировини для утворення оксидів азоту, найшкідливіших токсичних речовин. Допустивши, що показники емісії в такому процесі зміняться на незначну величину,

частка шкідливих утворень зменшиться пропорційно зменшенню частки атмосферного азоту в атмосферному повітрі, яке поступає в камеру згорання.

Для попереднього оцінювання таких змін необхідно, виходячи із концепції пропорційності швидкості реакції утворення шкідливих речовин, а також їх кількості, парціальному тиску атмосферного азоту в реакційній суміші, обчислити її склад при його звичайній концентрації, та при вмісту окислювача на рівні 30 і 40 % відн. Слід наголосити ще раз, що всі розрахунки в цій роботі ведуться для спалювання 1 м³ природного газу.

Всі дані, що характеризують якісний та кількісний склад реакційної суміші приведені в таблиці 2.

Для деяких інгредієнтів, а це стосується в нашому випадку об'ємів діоксиду вуглецю CO₂ і водяної пари H₂O, у відповідних колонках таблиці 2 для різних концентрацій окислювача об'єми згаданих інгредієнтів однакові за величиною.

Таблиця 2

Склад реакційної суміші для випадку спалювання природного газу в атмосферному повітрі при різному вмісті окислювача.

Вміст кисню (%)	Витрата атм. пов. (м ³)	Об'єм CO ₂ (м ³)	Частка атм. N (м ³)	Вміст H ₂ O (м ³)	Заг. об'єм (м ³)
20,98	10,21	1,02	8,07	2,09	21,39
30	7,145	1,02	≈5	2,09	15,26
40	5,36	1,02	2,144	2,09	10,62

Реальні співвідношення парціального тиску азоту можуть лежати при звичайному його концентрації в атмосферному повітрі, та при збагаченні його до 30 і 40 % відн. на рівні 0,717 та 0,496 відповідно. Валові викиди оксидів азоту можуть бути зниженні від 94,36 тон до 67,66 тон при збагаченому киснем повітрі у 30 % та до 48,8 тон при вмісті кисню у 40 %. Враховуючи похибку у 10 %, можна стверджувати, що навіть при нижчих концентраціях позитивний ефект буде значним.

Висновки. Хімічна реакція утворення оксидів азоту є ендотермічною, що приводить до підвищення температури у факелі, при цьому зростає швидкість реакції, можна зменшити розміри технологічного обладнання, а використання окислювача – збагаченого атмосферного повітря киснем прибирає певну кількість сировини для утворення шкідливих викидів.

Таким чином, модернізація газотурбінних установок шляхом переводу їх на спалювання газотурбінного палива, в тому числі і природного газу, 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. О. Г. Івченка. 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. *Проблеми загальної енергетики*. 2010. Вип. 3 (23). С. 41–47.
4. Энергетика. История, настоящее и будущее. От огня и воды к электричеству: в 5 т. / науч. ред. И. Н. Карп, Ю. Н. Ландау. Київ : ООО «Новый друк», 2011. Т. 1. 262 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. *Проблемы и опыт охраны окружающей среды* : сб. материалов докл. республ. науч.-практ. конф. 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. *Наук.-практ. журнал «Екологічні науки»*. 2018, № 2 (21). С. 59–64.
8. Шпильрайн Э. Э. Введение в водородную энергетику. Москва : «Энерго-атомиздат» 1984. 264 с.
9. Водородные энергетические технологии. Материалы семинара лаборатории ВЭТ ОИВТ РАН. *Сборник научных трудов*. Отв. ред. Дудников Д. О. Москва : ОИВТ РАН, 2017. Вып. 1. 190 с.
10. Сигал И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. Ленинград : Недра, 1988. 311 с.
11. ГКД 34.02.305-2002 Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок. [Чинний від 2002.07.01]. Київ, 2002 р. 43 с. (Методика визначення).
12. ГОСТ РФ 8.816-013. Газ природный, объемная теплота сгорания. Москва, 2013. 24 с. (Методика измерений калориметра сжигания с бомбой).
13. Теплота сгорания углеводородов состава $C_xH_yO_z$ Г. Т. Земский, и др. *Пожарная безопасность*. Киев, 2005. № 1. С. 55–93.
14. Крук І. С., Химко О. М., Крук О. І. Якість природного газу. Довідник. Київ, НаукаУЦЄБОПнафтогаз, 2010. 404 с.
15. Приходько М. А. Герасимов. Термодинаміка та теплопередача : навч. посіб. Рівне, 2008. 278 с.