

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ТУРБОКОМПРЕСОРНИХ УСТАНОВОК КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВІДІВ

О. М. Щербаків¹, Л. Д. Пляцук², В. П. Парафійник³¹ТОВ «Енейбл Україна», Одеса, Україна²Сумський державний університет, Суми, Україна³АТ «СМНВО-Інжиніринг», Суми, Україна

УДК 622.691.4

DOI: 10.52363/2522-1892.2024.2.9

Отримано: 2 листопада 2024

Прийнято: 28 листопада 2024

Cite as: Shcherbakov O., Plyatsuk L., Parafiynyk V. (2024). Environmental aspects of designing turbocompressor units of compressor stations of main gas pipelines. Technogenic and ecological safety, 16(2/2024), 61–68. doi: 10.52363/2522-1892.2024.2.9

Анотація

У статті розглянуті екологічні аспекти створення турбокомпресорних установок компресорних станцій магістральних газопроводів. Метою роботи є визначення та аналіз основних джерел забруднення навколишнього середовища, що виникають при експлуатації турбокомпресорних установок, а також аналіз сучасних технічних рішень, спрямованих на зменшення їх негативного впливу на довкілля. Об'єкт дослідження – робочий процес турбокомпресорних установок та його вплив на формування хімічного, теплового та акустичного забруднення навколишнього середовища. Предмет дослідження – показники екологічної ефективності турбокомпресорних установок. Методи дослідження: аналіз робочого процесу турбокомпресорних установок; огляд літературних джерел і діючих нормативних документів; систематизація багаторічного досвіду, отриманого в АТ «СМНВО-Інжиніринг» (м. Суми, Україна) при проектуванні та випробуванні подібного обладнання.

Найважливіші результати роботи полягають у наступному: визначено джерела хімічного, акустичного та теплового забруднення, що виникають при експлуатації турбокомпресорних установок з газотурбінним приводом і відцентровими компресорами; зроблено висновок про пріоритетність розвитку сухих методів спалювання палива для зниження викидів забруднюючих речовин. При цьому зазначена доцільність застосування систем каталітичного очищення відпрацьованих газів для модернізації існуючих компресорних станцій з метою забезпечення відповідності екологічним вимогам без заміни або значної доробки конструкції двигунів.

На прикладі газотурбінного газоперекачувального агрегату потужністю 16 МВт, виконано оцінку теплового забруднення навколишнього середовища. Зроблено висновок, що зниження теплового забруднення може бути досягнуто за рахунок підвищення енергоефективності турбокомпресорних установок, зокрема завдяки застосуванню складних робочих циклів привода, утилізації теплоти відпрацьованих газів, та створення на базі компресорних станцій магістральних газопроводів енерготехнологічних комплексів для виробництва електроенергії, тепла та холоду.

Результати роботи можуть бути використані при розробці екологічно більш ефективних турбокомпресорних установок, що особливо актуально в умовах глобальних кліматичних змін та зростаючих вимог міжнародних екологічних регламентів. Крім того, підвищення енергоефективності турбокомпресорних установок дозволить не тільки зменшити забруднення навколишнього середовища, але й знизити енергоспоживання та підвищити економічність транспортування газу.

Ключові слова: природний газ, компресорна станція, магістральний газопровід, турбокомпресорна установка, газотурбінний привід, відцентровий компресор, екологічні характеристики, каталітичне очищення, енергоутилізаційна установка.

Постановка проблеми

Компресорні станції (КС) магістральних газопроводів (МГ) є важливими елементами газотранспортної системи (ГТС) України, оскільки вони забезпечують основні технологічні процеси підготовки та транспортування природного газу. Від ефективності та надійності роботи КС МГ істотно залежить робота всієї ГТС, а отже і діяльність підприємств багатьох галузей економіки, зокрема теплоенергетики, комунального та сільського господарства, хімічного виробництва, металургії, транспорту та ін. галузей господарства. При цьому функціонування КС МГ пов'язане з істотним екологічним впливом, який в умовах глобальних кліматичних змін і зростаючого тиску з боку міжнародних екологічних нормативів та організацій, потребує ретельного аналізу та вирішення.

За даними НАК «Нафтогаз України» у 2018 році обсяг викидів забруднюючих речовин і парникових газів в атмосферне повітря підприємствами АТ «Укртрансгаз» становив відповідно 18,0 тис. т та 4391,7 тис. т в еквіваленті CO₂ [1]. Враховуючи дані

Національного центру обліку викидів парникових газів Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України за 2018-й рік [2] викиди парникових газів об'єктами ГТС складають приблизно 1,3 % від загальної кількості викидів парникових газів в Україні.

Аналіз даних по викидам КС свідчить, що найбільша кількість забруднюючих речовин та парникових газів потрапляє в атмосферу з відпрацьованими газами газотурбінних приводів (ГТП) газоперекачувальних і турбокомпресорних агрегатів (далі ГПА), а також з організованими та неорганізованими викидами природного газу [3, 4].

ГПА та створені на їх основі турбокомпресорні установки (ТКУ), окрім хімічного забруднення є також джерелом інтенсивного шумового та теплового забруднення навколишнього середовища.

Таким чином проблема створення екологічно ефективних ТКУ КС є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої вимагає проведення комплексних міждисциплінарних теоретичних та експериментальних досліджень.

Об'єктом дослідження в даній роботі є робочий процес турбокомпресорних установок та його вплив на формування хімічного, теплового та акустичного забруднення навколишнього середовища. Предмет дослідження – показники екологічної ефективності турбокомпресорних установок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідженню впливу об'єктів газової промисловості, зокрема КС МГ, на навколишнє середовище та технологіям, які забезпечують зменшення техногенного навантаження, присвячена значна кількість робіт [3–24].

Робота [5] містить узагальнення багаторічного досвіду проектування нафтогазових об'єктів колективом ВАТ «Укргазпроект». Авторами окреслені основні напрямки зменшення впливу КС МГ на навколишнє середовище шляхом розробки енергозберігаючого та екологічно безпечного обладнання та систем. Зокрема, наведено деякі результати досліджень, спрямованих на створення ефективних теплоутилізаційних установок ГПА, стан і перспективи розвитку малоємісійних камер згорання ГТД, а також вплив джерел шуму КС на шумове забруднення навколишнього середовища і засоби боротьби з акустичним забрудненням.

Автори роботи [6] зазначають, що найефективнішими способами зменшення кількості летючих викидів при транспортуванні природного газу є заміна існуючих газотурбінних ГПА на сучасні, які обладнанні приводом з ККД не нижче 36 %, компресорами з торцевими газодинамічними ущільненнями та модернізованою системою запуску ГТП; під'єднання ліній продувки компресорів ГПА до системи подачі паливного газу; заміна лінійних кранів та кранів об'язки КС; впровадження комп'ютерних систем оперативної діагностики ГПА та керування режимами роботи ГТС з урахуванням поточного технічного стану компресорного обладнання.

У роботі [3] виконано техніко-економічний аналіз існуючих технологій зменшення викидів NO_x з відпрацьованими газами ГТП. Авторами зроблено висновок, що малоємісійні камери згорання мають значний потенціал для подальшого вдосконалення своїх характеристик, а їх розробка є найбільш економічно доцільним способом зменшення викидів NO_x . При цьому варто відзначити, що створення ефективних та надійних малоємісійних камер згорання є нетривіальною задачею, яка потребує проведення серйозного комплексу теоретичних та експериментальних досліджень.

Авторами роботи [4] проаналізовані основні методи зменшення викидів забруднюючих речовин з відпрацьованими газами ГТП ГПА, зокрема, детально розглянуто питання використання систем каталітичного очищення відпрацьованих газів. За результатами виконаних числових досліджень була розроблена конструкція вихлопного тракту агрегату типу ГПА-Ц-16С з системою каталітичного очищення відпрацьованих газів від монооксиду вуглецю.

У роботі [7] досліджено застосування екологічно чистих матеріалів, зокрема, полідисперсних гранул аморфного льоду для очищення лопаток ротора та направляючого апарату компресора ГТД від забруднень. Крім того, автором удосконалено методику розрахунку концентрацій забруднюючих речовин на території КС, за рахунок уточнення ефективної висоти джерел викиду.

Варто зазначити, що авторами вказаних публікацій переважно розглянуто окремі види забруднень, спричинених експлуатацією ТКУ КС. Але оскільки ТКУ чинять комплексний вплив на навколишнє середовище і є джерелами хімічного, акустичного та теплового забруднення, доцільно створити методику та відповідні критерії для системного аналізу екологічної ефективності ТКУ.

Постановка завдання та методи дослідження

Метою роботи є визначення та аналіз основних джерел забруднення навколишнього середовища, що виникають при експлуатації турбокомпресорних установок, а також аналіз сучасних технічних рішень, спрямованих на мінімізацію негативного екологічного впливу. Методи дослідження: аналіз робочого процесу турбокомпресорних установок; огляд літературних джерел і діючих нормативних документів; систематизація багаторічного досвіду, отриманого в АТ «СМНВО-Інжиніринг» при проектуванні та випробуванні подібного обладнання.

Виклад основного матеріалу

Блоково-комплектні ТКУ являють собою комплекс енерготехнологічного обладнання, що забезпечує реалізацію наступних технологічних процесів: очищення природного газу на вході відцентрового компресору (ВЦК) від твердих часток та скрапленої вологи; перетворення хімічної енергії паливного газу в теплову та механічну енергію; перетворення механічної енергії приводу в енергію стисненого газу; охолодження стисненого газу; утилізацію теплоти відпрацьованих газів ГТП. Для реалізації зазначених технологічних процесів до складу ТКУ КС МГ входить різноманітне енергогенеруюче та енергоспоживаюче, теплообмінне та ємнісне обладнання, а також розвинена трубопровідна система з запірною регулюючою арматурою.

Як зазначалося раніше, основними шкідливими факторами, що впливають на природне та виробниче середовище у процесі експлуатації ТКУ є хімічне, акустичне та теплове забруднення.

Основними забруднюючими речовинами, які утворюються під час роботи ТКУ, є компоненти природного газу, продукти його згорання та неметанові леткі органічні сполуки.

Викиди забруднюючих речовин поділяються на організовані та неорганізовані. До перших належать викиди, які потрапляють у повітря через спеціально організовані системи. Ці викиди за тривалістю дії поділяють на залпові (наприклад, стравлювання газу з трубопроводів та технологічного обладнання

при проведенні регламентних робіт, при спрацюванні запобіжних клапанів та ін.) та постійні (відведення відпрацьованих газів ГТП, витоки буферного газу тощо). Витоки природного газу, що виникають при експлуатації ТКУ, можна розділити на 2 групи:

– викиди, обумовлені особливостями технологічного процесу (витоки буферного газу, стравлювання газу, продувка пилловловлювачів, газопроводів і т. ін.), величина яких залежить від рівня технологій та схемних рішень, прийнятих на етапі проектування КС або при її модернізації;

– технічні втрати природного газу, наявність та величина яких залежать від якості виготовлення та надійності обладнання, кваліфікації обслуговуючого персоналу та інших факторів (втрати газу внаслідок негерметичності арматури, енерготехнологічного обладнання та газових комунікацій).

Номенклатура забруднюючих речовин, що містяться у продуктах згорання палива визначається його компонентним складом та особливостями робочого процесу спалювального обладнання. Таким чином, основними забруднюючими речовинами, що виділяються під час спалювання природного газу з «типовим» хімічним складом є оксиди азоту та вуглецю. При використанні у якості палива природного газу з підвищеним вмістом сірководню та інших сполук сірки у відпрацьованих газах ГТП також може фіксуватися незначний вміст сірчистого ангідриду.

У 2014 році відбулося підписання Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом. Ця угода, серед іншого, передбачає узгодження екологічного законодавства України з ключовими європейськими нормами щодо охорони довкілля. Згідно з Директивою 2015/2193/EU концентрація NO_x у викидах від існуючих та нових газових турбін, що використовують у якості палива природний газ, на повинна перевищувати, відповідно, 150 мг/нм³ та 50 мг/нм³ при навантаженні вищому 70 % від номінальної потужності. Характерно, що Директива

2015/2193/EU не встановлює обмежень по концентрації монооксиду вуглецю (CO) у відпрацьованих газах, лише встановлює правила їх моніторингу.

У таблиці 1 наведені приведені концентрації NO_x та CO для найбільш поширених на КС ГТС України газотурбінних ГПА, а також ГТД, що виготовляються в Україні. Значення наведених концентрацій представлені для номінального режиму роботи двигуна.

Як видно з таблиці, характеристики викидів забруднюючих речовин більшості ГПА, що експлуатуються на КС МГ України, а також вітчизняних ГТД не відповідають вимогам Директиви 2015/2193/EU.

Основними методами зниження викидів забруднюючих речовин з продуктами згорання палива в ГТД є [3, 25, 26]:

– вдосконалення способів спалювання палива (розвиток так званих сухих методів, у тому числі із застосуванням каталізаторних камер згорання);

– впорскування води (пари) в камеру згорання ГТД для зниження викидів NO_x;

– застосування в вихлопних трактах ГТП спеціальних систем для очищення продуктів згорання.

На даний час пріоритетним напрямком зниження викидів забруднюючих речовин є розвиток сухих методів спалювання палива [25, 26]. Провідні світові виробники в галузі газотурбобудування активно працюють над створенням спеціальних систем сумішоутворення та спалювання паливо-повітряної суміші в камерах згорання, які характеризуються високою складністю. За даними ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» (м. Миколаїв) на сьогоднішній день на підприємстві розроблена і випробувана у складі ГТД ДГ90Л2.1 малоємійна камера згорання, яка забезпечує відповідність вимогам Директиви 2015/2193/EU. Проте для широкого застосування розробленої камери згорання потрібна перевірка ефективності та надійності її роботи в умовах експлуатації на КС.

Таблиця 1 – Приведені концентрації оксидів азоту та монооксиду вуглецю у відпрацьованих газах газотурбінних ГПА, що експлуатуються на КС України

Тип ГПА (ГТД)	N, кВт	η, %	Приведена концентрація, мг/нм ³	
			NO _x	CO
ГТК-10И (двигун MS-3002)	10300	25,9	230	60
ГТК-10	10000	29	180	60
ГПА-Ц-6,3 (двигун НК-12СТ)	6300	24	140	300
ГПУ-10 (двигун ДР-59)	10000	27,6	145	60
ГТН-6	6300	24	150	245
ГТ-750-6	6000	27	180	110
ГТК-25И (двигун MS 5002)	23900	27,7	175	50
ГПА-Ц-6,3 (двигун ДТ-71ПЗ)	6300	30,5	150	300
ГПА-Ц-8С (двигун ДТ-70П)	8000	32,45	75	300
ГПА-Ц-16С (двигун ДГ90Л2.1 ¹)	16000	33,5	50	100
ГПА-Ц-25С (двигун ДУ80Л1)	25000	34,8	80	150
ГПА-Ц-6,3А (двигун Д-336-2Т)	6300	30,0	150	300
ГПА-Ц-8А (двигун АИ-336-2-8)	8000	30,8	150	300

Примітка. Характеристики ГТД ДГ90Л2.1 з новою малоємійною камерою згорання були підтверджені у процесі заводських випробувань

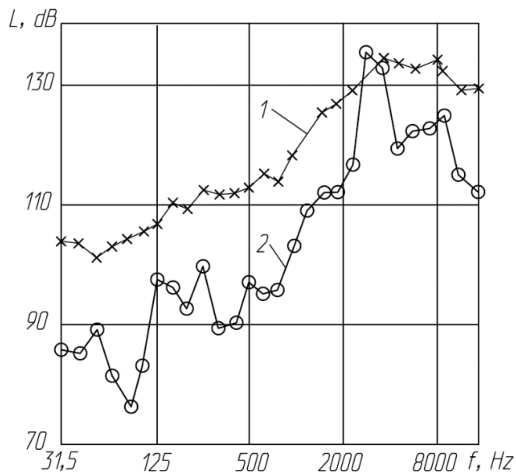


Рисунок 1 – Рівні звукового тиску на вході в ГТД:
1 – ГТД НК-16СТ; 2 – ГТД НК-12СТ

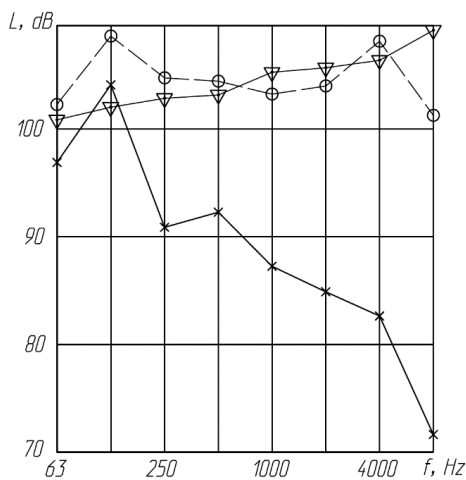


Рисунок 2 – Спектрограми шуму корпусу ГТД та електродвигуна СТДП-6300-2Б:
1 – ГТД НК-12СТ; 2 – ГТД НК-16СТ;
3 – СТДП-6300-2Б

Впорскування пари в проточну частину ГТД тривалий час було основним способом зниження викидів NO_x і знайшло переважне застосування в енергетиці. Головними його недоліками є потреба у значній кількості підготовленої води та жорсткі вимоги до її якості [3]. Зазначені особливості обмежують застосування цього методу на КС.

Останнім часом каталізаторні технології очищення продуктів згорання отримали широке поширення, особливо на теплоелектростанціях, у парогазових та газотурбінних установках, котельнях ЖКГ. Проте на КС МГ вони не знайшли широкого застосування через значні капітальні витрати. Водночас слід зазначити, що каталізаторне очищення відпрацьованих газів може бути ефективним рішенням при реконструкції існуючих КС, коли необхідно забезпечити відповідність екологічної характеристики ГПА сучасним нормативам без заміни або суттєвої доробки конструкції ГТД.

Як зазначалось раніше КС МГ є джерелами інтенсивного шумового забруднення. Домінуючими джерелами шуму на території КС є ГПА, блоки редукування, системи вентиляції, системи скидання

технологічного газу, апарати повітряного охолодження технологічного газу, а також трубопроводи об'язки ВЦК.

Основними внутрішніми джерелами шуму ГПА є ГТД та ВЦК.

Основним джерелом шуму ГТД є осьовий компресор, і перш за все перша ступінь компресора, яка створює у камері всмоктування ГПА рівень шуму, який досягає на високих частотах 134 дБ (рисунок 1). Шум процесу всмоктування на вході в ГТД розповсюджується вгору по потоку повітря через камеру всмоктування, глушники та повітроочисний пристрій в навколишнє середовище. Шум, який розповсюджується від корпусу ГТД, зумовлений генерацією шуму у компресорі, камері згорання, а також у турбіні. Спектр шуму від корпусу ГТД широкопasmовий (рисунок 2). Рівень шуму, що генерується силовою турбіною є співставним з шумом від камери всмоктування ГТД, спектр має високочастотний характер. Під час проходження потоку газу через вихлопну систему відбувається зміна шуму турбіни, генеруються резонансні шуми. При витіканні потоку з вихлопної шахти у результаті вихроутворення та турбулентності виникає шум вільного струменя.

Шум ВЦК випромінюється всмоктувальним та нагнітаючим патрубками, а також корпусом компресора. За своєю природою це здебільшого аеродинамічний шум, викликаний процесами вихроутворення, та неоднорідністю потоку. Окрім того, у ВЦК формується механічний шум, пов'язаний з дисбалансом ротора та роботою підшипників. ВЦК випромінюють шум високого рівня від 90 до 100 дБ з максимумом в октавах 1000 та 2000 Гц.

Основним джерелом шуму АПО газу є вентилятори. Найбільш інтенсивне випромінювання звуку, викликане роботою вентиляторів спостерігається у діапазоні від 250 до 1000 Гц та характеризується рівнем звукової потужності від 101 до 105 дБ.

Загальні вимоги захисту від шуму як на робочому місці, так і в довкіллі є наступні:

– згідно з ДСН 3.3.6.037-99 еквівалентний рівень шуму на маршруті регламентного обслуговування працюючих ГПА не повинен перевищувати 80 дБА на відстані 1,0 м від агрегату;

– дотримання допустимих рівнів звукового тиску в октавних смугах частот і рівнів звуку в робочих зонах на території КС відповідно до ДСН 3.3.6.037-99 при урахуванні одночасної роботи кількох ГПА та іншого устаткування КС;

– дотримання допустимих рівнів звукового тиску в октавних смугах частот і рівнів звуку на відстані 700 м від КС із урахуванням одночасної роботи кількох ГПА та іншого устаткування КС відповідно до ДБН В.1.1–31:2013.

Основними технічними заходами по зниженню шуму на КС є зниження рівня шуму у джерелі його виникнення; встановлення глушників шуму у повітряозабірній та вихлопній системах ГТД, повітропроводах системи вентиляції; використання звукопоглинальних кожухів та шумопоглинальних покриттів трубопроводів; раціональне планування генплану КС з віддаленням шумних установок від

робочих місць; влаштування протишумових екранів; організація системи експлуатації таким чином, аби зменшити час перебування персоналу у найбільш шумних зонах; використання індивідуальних засобів захисту.

Як зазначалося раніше, ТКУ КС МГ є також інтенсивними джерелами теплового забруднення. Істотний вплив на показники ТКУ по тепловому забрудненню відіграє тип застосовуваного приводу. Джерелами теплового забруднення в ТКУ з електроприводом є теплові виділення від двигуна та корпусу компресора, а також теплові викиди системи охолодження технологічного газу та оливоохолоджувачів. Для ТКУ з ГТП теплове забруднення обумовлено тими самими джерелами, що й для ТКУ з електроприводом, проте замість порівняно незначних теплових викидів від електродвигуна додаються інтенсивніші теплові викиди від ГТП. Тепло, що виділяється при роботі ГТП у навколишнє середовище, можна визначити за формулою, МВт:

$$Q_{ГТП} = N_{ГТП} \left(\frac{100}{\eta_{ГТП}} - 1 \right), \quad (1)$$

де $N_{ГТП}$ – потужність ГТП, МВт

$\eta_{ГТП}$ – ефективний ККД ГТП, %.

У таблиці 2 наведено результати розрахунку втрат тепла в навколишнє середовище при роботі ГТД НК-16СТ у складі агрегату типу ГПА-Ц-16.

Таблиця 2 – Розрахункові втрати тепла при роботі ГТД НК-16СТ

T_a, K	$N_{ГТП}, MВт$	$\eta_{ГТП}, \%$	$Q_{ГТП}, MВт$
268	19,0	29,11	46,3
288	16,0	27,31	42,6
308	13,7	25,71	39,6

Значна частина теплових втрат може бути зменшена за допомогою використання різних способів утилізації теплоти відпрацьованих газів в атмосферу. Основними способами утилізації теплоти відпрацьованих газів ГПА є забезпечення потреб теплопостачання, підвищення ефективності ГТП за рахунок використання складних робочих циклів (регенеративного, газопарового тощо); а також виробництво електроенергії або холоду для потреб КС чи зовнішнього споживача.

З огляду на високу енергоємність економіки України, а також серйозну нестачу генеруючих потужностей в її енергосистемі, створення на базі КС енерготехнологічних комплексів з виробництва електроенергії, теплоти і холоду є перспективним напрямком розвитку ГТС. Це дозволить знизити витрати на транспортування природного газу, а також може стати основою для розвитку ефективної регіональної енергетики та енерготехнологічної інфраструктури.

Слід зазначити, що для існуючих конструкцій ГТД з простим робочим циклом, які мають

ефективний ККД 30...40 % (для потужності 6,3...32 МВт, відповідно), утилізація теплових ресурсів відпрацьованих газів дозволяє підвищити коефіцієнт використання палива до 0,8...0,85. Однак реалізація цього підходу пов'язана з високим рівнем капітальних витрат (особливо при реалізації складних робочих циклів), необхідністю підвищення надійності енерготехнологічного обладнання, а також вимагає розробки відповідної законодавчої та нормативної бази для практичного вирішення питань, пов'язаних із генерацією електроенергії, тепла і холоду, вироблених енерготехнологічними установками, що функціонують на базі КС.

У зв'язку з вищевказаним, на сьогодні найпоширенішим способом утилізації теплоти відпрацьованих газів ГПА є теплофікаційний цикл для теплопостачання КС, пристанційних селищ, тепличних господарств тощо. Недоліком такої схеми є неможливість використання всіх теплових ресурсів ГТД через відсутність у умовах КС постійних споживачів виробленого тепла. Для реалізації теплофікаційного циклу ГПА конструкції АТ «СМНВО-Інжиніринг» оснащуються утилізаторами теплоти тепловою потужністю 3,5...9 МВт, які створюються на основі трубчаторебристих теплообмінників. Їх застосування дозволяє досягти коефіцієнта використання палива 0,36...0,46.

Одним із перспективних способів підвищення енергоефективності ГПА, та зменшення теплового забруднення є також утилізація низькопотенційної теплоти, яка відводиться оливою від підшипників ЦК та ГТД. Ця теплота може бути використана для підігріву паливного газу у спеціальних газооливо-вих теплообмінниках (ГОТ) [27]. Застосування ГОТ дозволяє знизити витрати палива, зменшити споживання електроенергії, що витрачається на охолодження оливи та зменшити теплове забруднення навколишнього середовища. Як показали результати розрахунків, застосування ГОТ у системі змащування ГТД агрегату типу ГПА-Ц-16С дозволяє зменшити прямі втрати тепла в навколишнє середовище приблизно на 50 кВт, а також зменшити витрати паливного газу на 42000 nm^3 /рік та знизити споживання електроенергії вентиляторами оливоохолоджувачів на 23000 кВт·год/рік.

Висновки

За результатами виконаної роботи можна зробити наступні висновки:

1. Блоково-комплектні ТКУ МГ є джерелами інтенсивного хімічного, акустичного та теплового забруднення навколишнього середовища та істотно впливають на екологічну обстановку в регіонах розташування КС газової та нафтової промисловості.

2. Враховуючи комплексний вплив ТКУ КС на навколишнє середовище доцільно розробити методику та відповідні критерії для системного аналізу екологічної ефективності ТКУ КС.

3. Враховуючи стратегічне значення ГТС для України та імплементацію екологічних директив та регламентів ЄС у сфері охорони довкілля,

підвищується актуальність завдань по вдосконаленню конструкції ТКУ та КС з метою підвищення їх енергоефективності та покращення екологічних характеристик. За результатами роботи у якості основних задач з підвищення екологічної ефективності ТКУ КС МГ можна визначити наступні:

- підвищення енергоефективності ВЦК та ГТП, у т. ч. шляхом використання складних робочих процесів, з метою зменшення викидів CO₂ та зниження теплового забруднення навколишнього середовища;
- зниження емісії забруднюючих речовин шляхом вдосконалення робочого процесу камер згорання ГТД, а також шляхом використання систем каталітичного очищення відпрацьованих газів;
- зменшення викидів природного газу при експлуатації ТКУ та проведенні регламентних робіт шляхом впровадження ощадливих схемних рішень;

– зниження акустичного забруднення шляхом впровадження відповідних проектних рішень при створенні КС, раціонального компоунування обладнання ТКУ, а також вдосконалення конструкції шумоглушників та огорожувальних конструкцій блоків ТКУ;

– підвищення енергоефективності ТКУ та зменшення теплового забруднення навколишнього середовища шляхом застосування більш ефективних енергоутилізаційних технологій. Крім того, перспективними напрямками подальшого вдосконалення ГПА та КС на їх основі є перетворення КС МГ в енерготехнологічні комплекси для виробництва електроенергії, тепла та холоду.

Вирішення зазначених задач дозволить не тільки зменшити техногенне навантаження на навколишнє середовище, але й знизити енергоспоживання та підвищити економічність транспортування газу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Річний звіт «Нафтогазу України» за 2018 рік. Нафтогаз України, 2018. 224 с. URL: <https://www.slideshare.net/slideshow/2018-152295656/152295656> (дата звернення: 02.11.2024).
2. Ukraine's Greenhouse Gas Inventory 1990-2021. Annual National Inventory Report for Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol. Kyiv, Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine, 2023. 568 p. URL: <https://unfccc.int/documents/628276> (дата звернення: 02.11.2024).
3. Major V. Cost Analysis of NOx Control Alternatives for Stationary Gas Turbines. ONSITE SYCOM Energy Corporation, 1999. URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/gas_turbines_nox_cost_analysis.pdf (дата звернення: 02.11.2024).
4. The results of pre-design studies on the development of a new design of gas turbine compressor package of GPA-C-16 type / A. V. Smimov et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017. Vol. 233. Art. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/233/1/012022.
5. Енергоекологічна безпека нафтогазових об'єктів / Р. М. Говдяк, Я. М. Семчук, Л. В. Чабанович, Г. М. Кривенко. Івано-Франківськ : Лілея НВ, 2007. 554 с.
6. Лещенко І. Ч. Впровадження сучасних технологій у газотранспортній системі України для зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу. *Проблеми загальної енергетики*. 2012. Вип. 3 (23). С. 41–47.
7. Карпенко С. В. Нормалізація впливу на довкілля шуму та викидів забруднюючих речовин компресорних станцій магістральних газопроводів : дис. канд. техн. наук : 21.06.01 «Екологічна безпека». Київ, 2021. 232 с.
8. Михайлюк Ю. Д. Характеристика джерел утворення забруднювальних речовин Богородчанського лінійно-виробничого управління магістральних газопроводів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2014. Вип. 24.8. С. 125–131.
9. Михайлюк Ю. Д. Дослідження характеристик шумового забруднення на компресорних станціях магістральних газопроводів. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2014. № 2. С. 29–36.
10. Інвентаризація викидів забруднювальних речовин в атмосферу із газотурбінних установок газоперекачувальних агрегатів / О. І. Запорожець, С. В. Карпенко, С. О. Пузік, Б. В. Сагайдак. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2021. № 3. С. 58–70. DOI: 10.20535/2617-9741.3.2021.241059.
11. Семчук Я. М., Лялюк-Вітер Г. Д. Дослідження процесів формування ареалів забруднень в атмосфері в районі компресорних станцій магістральних газопроводів. *Прикарпатський вісник НТШ*. Число. 2018. № 2. С. 179–190.
12. Мандрик О. М. Розвиток наукових основ підвищення рівня екологічної безпеки при транспортуванні природного газу : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.01 «Екологічна безпека». Івано-Франківськ, 2013. 40 с.
13. Antonanzas J., Quinn J. C. Regional greenhouse gas analysis of compressor drivers in natural gas transmission systems in Canada. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 400. Art. 136671. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136671.
14. Hendryx M., Luo J. Natural gas pipeline compressor stations: VOC emissions and mortality rates. *The Extractive Industries and Society*. 2020. Vol. 7, Issue 3. P. 864-869. DOI: 10.1016/j.exis.2020.04.011.
15. Community Health Impacts From Natural Gas Pipeline Compressor Stations / C. D. Davis et al. *Geohealth*. 2023. Vol. 7, Issue 11. Art. e2023GH000874. DOI: 10.1029/2023GH000874.
16. Summary on compressor stations and health impacts. Southwest Pennsylvania environmental health project, 2015. URL: <https://sape2016.files.wordpress.com/2014/01/swpa-ehp-compressor-station-emissions-and-health-impacts-02-24-2015.pdf> (дата звернення: 02.11.2024).
17. Green L. C., Crouch E. A. C. Public health assessment of expected airborne emissions from the proposed Lambert Compressor Station. Pittsylvania county, Virginia, 2021. URL: https://www.mvpsouthgate.com/wp-content/uploads/2021/09/Public_Health_Assessment_L.pdf (дата звернення: 02.11.2024).
18. Johnson D. R., Covington A. N., Clark, N. N. Methane emissions from leak and loss audits of natural gas compressor stations and storage facilities. *Environmental Science & Technology*. 2015. Vol. 49(13). P. 8132–8138. URL: 10.1021/es506163m.
19. Survey of airborne organic compounds in residential communities near a natural gas compressor station: Response to community concern / K. A. V. Martin et al. *Environmental Advances*. 2021. Vol. 5. Art. 100076. DOI: 10.1016/j.envadv.2021.100076.
20. Characterization of methane plumes downwind of natural gas compressor stations in Pennsylvania and New York / B. F. Payne et al. *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 580. P. 1214–1221. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.082.
21. Russo P. N., Carpenter D. O. Air emissions from natural gas facilities in New York state. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. Vol. 16(9), 1591. DOI: 10.3390/ijerph16091591.
22. Strizhenok A. V., Korelskiy D. S. Estimation and reduction of methane emissions at the scheduled and repair outages of gas-compressor units. *Journal of Ecological Engineering*, 2019. Vol. 20(1). P. 46–51. DOI: 10.12911/22998993/93943.
23. Walter C. Air pollution from Pennsylvania shale gas compressor stations – report. FracTracker Alliance, 2020. URL: <https://www.fractracker.org/2020/03/air-pollution-pennsylvania-compressor-stations/> (дата звернення: 02.11.2024).

24. Moates S. J. Reducing Environmental Impacts of Natural Gas Compressor Stations and Applicability of the Current Regulatory Framework: PhD Thesis. *All ETDs from UAB*. Vol. 548. Birmingham, Alabama, 2021. 225 p. URL: <https://digitalcommons.library.uab.edu/etd-collection/548> (дата звернення: 28.08.2024).
25. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) / Lecomte T. et al. Luxembourg, 2017. 986 p. DOI: 10.2760/949.
26. Schorr M. M., Chalfin J. Gas Turbine NOx Emissions Approaching Zero – Is it worth the price? G. E. p. s. (GE), ed. Schenectady. New York: GE Power Generation, 1999. P. 9. URL: https://www.gevernova.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/downloads/gas-new-site/resources/reference/ger-4172-gas-turbine-nox-emissions-approaching-zero-worth-price.pdf (дата звернення: 28.08.2024).
27. Yokell S. Double-Tubesheet Heat-Exchanger Design Stops Shell-Tube Leakage. *Chemical Engineering*. 1973. May 14.

Shcherbakov O., Plyatsuk L., Parafiyuk V.

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF DESIGNING TURBOCOMPRESSOR UNITS OF COMPRESSOR STATIONS OF MAIN GAS PIPELINES

The article examines the environmental aspects of creating turbo-compressor units for compressor stations of main gas pipelines. The aim of the study is to identify and analyze the main sources of environmental pollution arising from the operation of turbo-compressor units, as well as to analyze modern technical solutions aimed at reducing their negative impact on the environment. This goal is achieved through an analysis of the operational processes of turbo-compressor units, a review of literature sources and applicable regulations, as well as the systematization of many years of experience gained at JSC “SMNPO-Engineering” (Sumy, Ukraine) in the design and testing of similar equipment.

The most important results of the work are as follows: sources of chemical, acoustic, and thermal pollution generated during the operation of turbo-compressor units with gas turbine drives and centrifugal compressors have been identified; a conclusion has been drawn about the priority of developing dry fuel combustion methods to reduce emissions of pollutants. It is noted that the application of catalytic exhaust gas purification systems is advisable for modernizing existing compressor stations to ensure compliance with environmental requirements without replacing or significantly reworking engine designs.

Using a 16 MW gas turbine compressor unit as an example, an assessment of thermal pollution in the environment has been carried out. It has been concluded that reducing thermal pollution can be achieved by increasing the energy efficiency of turbo-compressor units, particularly through the application of complex working cycles of the drive, utilizing waste heat from exhaust gases, and creating energy technology complexes based on compressor stations of main gas pipelines for the production of electricity, heat, and cooling.

The results of this work can be used in the development of environmentally more efficient turbo-compressor units, which is especially relevant in the context of global climate change and increasing requirements of international environmental regulations. Moreover, increasing the energy efficiency of turbo-compressor units will not only reduce environmental pollution but also lower energy consumption and improve the cost-effectiveness of gas transportation.

Key words: natural gas, compressor station, main gas pipeline, turbo-compressor unit, gas turbine drive, centrifugal compressor, environmental characteristics, catalytic purification, energy recovery unit.

REFERENCES

1. Naftohaz Ukrainy. (2018). *Richnyi zvit NAK “Naftohaz Ukrainy” za 2018 rik*. [The Annual Report of NJSC Naftogaz of Ukraine for 2018]. URL: <https://www.slideshare.net/slideshow/2018-152295656/152295656>. [in Ukrainian]
2. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2023). *Ukraine’s Greenhouse Gas Inventory 1990-2021. Annual National Inventory Report for Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol*. Kyiv. URL: <https://unfccc.int/documents/628276>.
3. Major, B. (1999). *Cost Analysis of NOx Control Alternatives for Stationary Gas Turbines*. ONSITE SYCOM Energy Corporation. URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4_gas_turbines_nox_cost_analysis.pdf.
4. Smirnov, A. V., Chobenko, V. M., Shcherbakov, O. M., Ushakov, S. M., Parafiyuk, V. P., & Sereda, R. M. (2017). The results of pre-design studies on the development of a new design of gas turbine compressor package of GPA-C-16 type. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 233, 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/233/1/012022.
5. Govdyak, R. M., Semchuk, Ya. M., Chabanovich, L. B., & Kryvenko, G. M. (2007). *Energoekologichna bezpeka naftogazovykh ob'yektiv* [Energy and Environmental Safety of Oil and Gas Facilities]. Ivano-Frankivsk: Lileya NV. [in Ukrainian]
6. Leshchenko, I. Ch. (2013). Vprovadzhennya suchasnykh tekhnologiy u gazotransportnyi systemi Ukrainy dlya zmenshennya vykydiv shkidlyvykh rechovin v atmosferu [Implementation of Modern Technologies in Gas Transmission System of Ukraine to Reduce Harmful Emissions into the Atmosphere]. *Problemy zagal'noyi energetyky*, 3 (23), 41–47. [in Ukrainian]
7. Karpenko, S. V. (2021). *Normalizatsiya vplyvu na dovkillya shumy ta vykydiv zabrudnyuyuchykh rechovin kompresornykh stantsiy magistral'nykh gazoprovodiv* [Normalization of Environmental Impact from Noise and Pollutant Emissions of Compressor Stations in Main Gas Pipelines]. (Candidate's thesis). National Aviation University. Kyiv. [in Ukrainian]
8. Mykhailiuk, Yu. D. (2014). Kharakterystyka dzherel utvorennia zabrudnyval'nykh rechovin Bohorodchans'kogo liniyno-vyrobnychogo upravlinnya magistral'nykh gazoprovodiv [Contaminant Generation Sources Characteristic of Bohorodchany Main Gas Pipelines Line and Staff Manufacturing Department]. *Naukovy visnyk NLTU Ukrainy*, 24.8, 125–131. [in Ukrainian]
9. Mykhaylyuk, Yu. D. (2014). Doslidzhennya kharakterystyk shumovogo zabrudnennya na kompresornykh stantsiyakh magistral'nykh gazoprovodiv [Study of noise pollution characteristics at compressor stations of main gas pipelines]. *Ekologichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannya*, 2 (10), 29–35. [in Ukrainian]
10. Zaporozhets, O. I., Karpenko, S. V., Puzik, S. O., & Sagaydak, B. V. (2021) Inventaryzatsiya vykydiv zabrudnyval'nykh rechovin v atmosferu iz gazoturbinnykh ustanovok gazoperekachuval'nykh agregativ [Inventory of pollutant emissions into the atmosphere from gas turbine installations of gas pumping units]. *Visnyk NTUU “KPI imeni Igorya Sikors'kogo”, Seriya: Khimichna inzheneriya, ekologiya ta resursozbezpechennya*, 3, 58–70. DOI: 10.20535/2617-9741.3.2021.241059. [in Ukrainian]
11. Semchuk, Ya. M., & Lialyuk-Viter, G. D. (2018). Doslidzhennya protsesiv formuvannya arealiv zabrudnen v atmosferi v rayoni kompresornykh stantsiy magistral'nykh gazoprovodiv [Research of processes of formation pollution areas in atmosphere near compressor stations of trunk gas pipelines]. *Prykarpats'ky visnyk NTSh. Chislo*, 2, 179-190. doi: 10.31471/2304-7399-2018-2(46)-179-190 [In Ukrainian].
12. Mandryk, O. M. (2013). *Rozvytok naukovykh osnov pidvyshchennya rivnya ekologichnoyi bezpeky pry transportuvanni pryrodnoho gazu*. [The development of scientific principles of ecological safety level enhancement in natural gas transportation]. (Extended abstract of Dostor's thesis). Ivano-Frankivsk, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. [in Ukrainian]
13. Antonanzas, J., & Quinn, J. C. (2023). Regional greenhouse gas analysis of compressor drivers in natural gas transmission systems in Canada. *Journal of Cleaner Production*, 400, 136671. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136671.

14. Hendryx, M., & Luo, J. (2020). Natural gas pipeline compressor stations: VOC emissions and mortality rates. *The Extractive Industries and Society*, 7(3), 864–869. DOI: 10.1016/j.exis.2020.04.011.
15. Davis, C. D., Frazier, C., Guennouni, N., King, R., Mast, H., Plunkett, E. M., & Quirk, Z. J. (2023). Community Health Impacts From Natural Gas Pipeline Compressor Stations. *Geohealth*, 7(11), e2023GH000874. DOI: 10.1029/2023GH000874.
16. Southwest Pennsylvania environmental health project. (2015). *Summary on compressor stations and health impacts*. URL: <https://sape2016.files.wordpress.com/2014/01/swpa-ehp-compressor-station-emissions-and-health-impacts-02-24-2015.pdf>.
17. Green, L. C., & Crouch, E. A. C. (2021). *Public health assessment of expected airborne emissions from the proposed Lambert Compressor Station*. Pittsylvania county, Virginia. URL: https://www.mypsouthgate.com/wp-content/uploads/2021/09/Public_Health_Assessment_L.pdf.
18. Johnson, D. R., Covington, A. N., & Clark, N. N. (2015). Methane emissions from leak and loss audits of natural gas compressor stations and storage facilities. *Environmental Science & Technology*, 49(13), 8132–8138. DOI: <https://doi.org/10.1021/es506163m>.
19. Martin, K. A. V., Lin, E. Z., Hilbert, T. J., Pollitt, K. J. G., & Haynes, E. N. (2021). Survey of airborne organic compounds in residential communities near a natural gas compressor station: Response to community concern. *Environmental Advances*, 5, 100076. DOI: 10.1016/j.envadv.2021.100076.
20. Payne, B. F., Ackley, R., Paige Wicker, A., Hildenbrand, Z. L., Carlton, D. D., & Schug, K. A. (2017). Characterization of methane plumes downwind of natural gas compressor stations in Pennsylvania and New York. *Science of the Total Environment*, 580, 1214–1221. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.082.
21. Russo, P. N., & Carpenter, D. O. (2019). Air emissions from natural gas facilities in New York state. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(9), 1591. DOI: 10.3390/ijerph16091591.
22. Strizhenok, A. V., & Korelskiy, D. S. (2019). Estimation and reduction of methane emissions at the scheduled and repair outages of gas-compressor units. *Journal of Ecological Engineering*, 20(1), 46–51. DOI: 10.12911/22998993/93943.
23. Walter, C. (2020). *Air pollution from Pennsylvania shale gas compressor stations – report*. URL: <https://www.fractracker.org/2020/03/air-pollution-pennsylvania-compressor-stations/>.
24. Moates, S. J. (2021). Reducing Environmental Impacts of Natural Gas Compressor Stations and Applicability of the Current Regulatory Framework. *All ETDs from UAB*, 548. URL: <https://digitalcommons.library.uab.edu/etd-collection/548>.
25. Lecomte, T., Ferreria De La Fuente, J., Neuwahl, F., Canova, M., Pinasseau, A., Jankov, I., Brinkmann, T., Roudier, S., & Delgado Sancho, L. (2017). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)*. Luxembourg. DOI: 10.2760/949.
26. Schorr, M. M., & Chalfin, J. (1999). *Gas Turbine NOx Emissions Approaching Zero – Is it worth the price?* URL: https://www.governova.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/downloads/gas-new-site/resources/reference/ger-4172-gas-turbine-nox-emissions-approaching-zero-worth-price.pdf.
27. Yokell, S. (1973). Double-Tubesheet Heat-Exchanger Design Stops Shell-Tube Leakage. *Chemical Engineering*, May 14.