

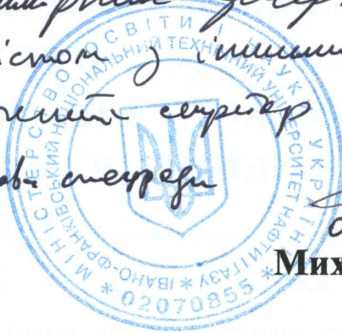
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ

УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

*Принятим дисертації і затверджено згідно з
змістом її змісту і змісту.*

Вчений секретар

Голова кафедри



[Signature] /Копія В.Р./
[Signature] /Севчук Л.М./

На правах рукопису

07.04.16р.

Михайлюк Юлія Дмитрівна

УДК 502.3:504.5:662.6/7

[Signature]

**ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ АТМОСФЕРНОГО
ПОВІТРЯ В РАЙОНАХ РОЗТАШУВАННЯ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ**

Спеціальність 21.06.01 – «Екологічна безпека»

Дисертація

на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Науковий керівник:

Мандрик Олег Миколайович,

доктор технічних наук, професор

НТБ
ІФНТУНГ



d581

Івано-Франківськ – 2016

1501

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	4
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В РАЙОНАХ РОЗТАШУВАННЯ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ	10
1.1. Характеристика компресорних станцій магістральних газопроводів як екологічно-небезпечних об'єктів	11
1.2. Особливості утворення джерел забруднення під час роботи газоперекачувальних агрегатів	17
1.3. Основні причини та екологічні наслідки відмов на компресорних станціях	22
1.4. Шляхи зменшення викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря	30
1.5 Мета і постановка завдань дослідження	37
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗГОРАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В КАМЕРІ ЗГОРАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ	40
2.1. Аналіз складу та динаміки викидів шкідливих речовин під час роботи КС	40
2.2. Дослідження процесу утворення оксидів азоту в процесі експлуатації газоперекачувального агрегату	46
2.2.1. Теоретичні аспекти утворення оксидів азоту в процесі експлуатації ГПА	46
2.2.2. Методика досліджень оксидів азоту у викидах ГПА	49
2.3. Утворення оксидів вуглецю в процесі експлуатації ГПА	53
2.4. Дослідження концентрацій викидних газів з використанням газоаналізатора Testo-350	58
2.5. Математична модель процесів горіння газу в камері згорання	60
Висновки до розділу	71

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ УТВОРЕННЯ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН ЗА РІЗНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ	72
3.1. Методика проведення досліджень	72
3.2. Результати дослідження еколого-технічних характеристик роботи ГПА	73
Висновки до розділу	97
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ЗАХОДІВ ТА СПОСОБІВ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИМИ АГРЕГАТАМИ	99
4.1. Дослідження впливу на довкілля параметрів спалювання газу газоперекачувального агрегату	99
4.2. Дослідження деяких особливостей розповсюдження викидів продуктів згорання під час роботи компресорної станції	124
4.3. Розроблення й реалізація способу та схеми пристрою для зменшення викидів оксиду вуглецю в атмосферу	131
4.4. Розроблення рекомендацій для зменшення шкідливих викидів під час роботи газоперекачувального агрегату ГПА типу ГТК-10І	133
Висновки до розділу	137
ВИСНОВКИ	139
ДОДАТКИ	141
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	145

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АПО	апарат повітряного охолодження
ГДК	гранично допустима концентрація
ГПА	газоперекачувальний агрегат
ГТУ	газотурбінна установка
ЗР	забруднювальна речовина
КС	компресорна станція
ССЗ	санітарно-захисна зона
α	коефіцієнт надлишку повітря
П	потужність
Tз	температура згорання
Q	витрати газу

ВСТУП

Актуальність теми. Газотранспортна система України є однією з найбільших за розмірами в Європі, яка складається з газопроводів загальною довжиною майже 37 тис. км, 74 компресорних станцій з 713 газоперекачувальними агрегатами (ГПА), в тому числі 438 з газотурбінним приводом і 96 газомотокомпресорів, енергоносієм для яких є транспортований газ. На привід газоперекачувальних агрегатів витрачається 0,5–1,5 % природного газу від обсягу перекачування. Спалювання такої кількості газу погіршує рівень екологічної безпеки атмосферного повітря в районах розташування компресорних станцій.

На сьогодні накопичено матеріали про негативний вплив компресорних станцій (КС) на навколишнє середовище. КС викидають шкідливі речовини, які впливають на рослинний і тваринний світ, а також на приземний шар атмосфери. Найбільшу небезпеку створюють джерела забруднення атмосфери, пов'язані, в першу чергу, з процесами спалювання неорганічного палива. У камерах згорання газоперекачувальних агрегатів газотурбінних двигунів утворюються такі шкідливі речовини як оксид і діоксид азоту, оксид вуглецю та ін., які забруднюють атмосферне повітря. Разом з тим процес спалювання газу є ще не достатньо регульованим, в атмосферу потрапляють токсичні продукти згорання газу, концентрація яких може перевищувати гранично допустимі рівні. Для газоперекачувальних агрегатів, що перебувають в експлуатації на КС, проблема зниження токсичності згорання газу ще не достатньо вирішена.

Отже, подальше вдосконалення технологій спалювання природного газу в камерах згорання, конструкцій газових пристроїв, методів прогнозування складу шкідливих викидів, які забруднюють атмосферу, та способів ушкодження шкідливих речовин є актуальним і важливим технічним завданням, що потребує подальшого розвитку.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Робота носить науково-прикладний характер і сприяє виконанню оновленої «Енергетичної

стратегії України на період до 2030 року», схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України. Дисертація виконана на базі досліджень, проведених за участю автора, Івано-Франківським національним технічним університетом нафти і газу з держбюджетної та госпдоговірної тематик № 0115U002280 2015-2016 р. (Д-5-15-Д «Методологія екологічно-безпечного використання джерел енергії у сталому туристично-рекреаційному розвитку Карпатського регіону»). Роботу також проведено згідно з програмою («Програма охорони навколишнього природного середовища в межах нафтогазових промислів Богородчанського району на 2010-2015 рр.»), планів упровадження нової техніки Богородчанського лінійного виробничого управління магістральних газопроводів.

Метою роботи є розроблення науково-технічних методів і засобів щодо зменшення шкідливого впливу викидів компресорних станцій на довкілля.

Відповідно до мети дослідження передбачено вирішення таких **завдань**:

- розроблення математичної моделі процесів горіння газу в камері згорання;
- отримання багатфакторних залежностей утворення викидів забруднювальних речовин в атмосферу при різних режимах роботи газоперекачувального агрегату;
- дослідження закономірностей розповсюдження викидів продуктів згорання в атмосферу;
- удосконалення способу очищення викидних газів газотурбінних агрегатів від оксиду вуглецю, розроблення схеми пристрою для його реалізації та пристроїв для контролю забруднення атмосферного повітря твердими частинками.

Об'єкт дослідження – процеси утворення забруднювальних речовин під час роботи ГПА компресорної станції.

Предмет дослідження – методи та засоби зменшення забруднення атмосферного повітря при роботі ГПА.

Методи дослідження – представляють комплекс, що містить аналіз сучасного стану досліджень екологічної безпеки на КС магістральних газопроводів і проведення експериментальних досліджень із використанням

методики планування експериментів і статистичного аналізу експериментальних залежностей, математичне моделювання з використанням стандартних програмних продуктів.

Наукова новизна:

– *уперше встановлено* залежності для визначення коефіцієнтів теплопередачі, а також температури вторинного повітря на вході в зону змішування камери згорання ГТУ шляхом математичного моделювання за відомими параметрами режиму експлуатації;

– *удосконалено* метод комплексного обстеження характеристик газотурбінного ГПА, що дозволяє діагностувати параметри, які впливають на концентрацію продуктів згорання;

– *отримано удосконалену* залежність для оцінки розповсюдження забруднення атмосфери в районах розташування компресорних станцій;

– *подальшого розвитку* набули конструктивні технічні та технологічні рішення щодо покращення екологічної безпеки при експлуатації компресорних станцій, а саме, з контролю концентрації твердих частинок у повітрі та з очищення викидних газів від оксиду вуглецю.

Практичне значення одержаних результатів.

Знайшли подальший розвиток теоретичні дослідження, пов'язані з деталізацією роботи камери згорання, отримання залежностей утворення продуктів згорання для прогнозування викидів шкідливих речовин в атмосферу.

Отримано прогнозні багатофакторні залежності зміни концентрації викидів, які дозволяють визначати основні екологічні показники роботи ГПА при різних технологічних режимах.

Запропоновано нові пристрої для вимірювання концентрації твердих частинок у повітрі, спосіб очищення викидних газів компресорних установок від оксидів вуглецю і пристрій для його реалізації, які захищені патентами України № 93599, № 96170, № 102157.

Запропоновано напрямки підвищення рівня екологічної безпеки атмосферного повітря на території Богородчанського ЛВУМГ.

Особистий внесок автора.

Особистий внесок автора полягає у безпосередній його участі на всіх етапах виконання роботи – від формування мети і завдань до експериментальних досліджень і розроблення рекомендацій та їх впровадження. Дисертація є самостійною науковою завершеною працею автора. Висновки та рекомендації, у тому числі й ті, що характеризують наукову новизну, одержані автором особисто. Автором розроблено комплексне еколого-технічне обстеження газоперекачувального агрегату на різних технологічних режимах його роботи, проведено багатофакторне математичне моделювання процесів горіння в камері згорання ГТУ та отримано залежності утворення викидів оксиду вуглецю CO і оксидів азоту NO_x при зміні: коефіцієнту надлишку повітря, температури продуктів згорання, витрати газу та потужності ГПА.

Запропоновані та захищені патентами пристрої для контролю твердих частинок у повітрі, а також спосіб знешкодження оксиду вуглецю.

За вагомих особистий внесок у розвиток винахідництва і раціоналізації на Прикарпатті автор нагороджена дипломом лауреата обласного рейтингового огляду «Галицький кмітливець 2015» як переможець у номінації «Кращий молодий винахідник» та нагрудним знаком «Галицький кмітливець».

Одержані у дисертаційній роботі результати та рекомендації впроваджено в УМГ «ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ», Державну адміністрацію управління екології та природних ресурсів в Івано-Франківській області, які підтвердили основні положення роботи, а також у навчальний процес ІФНТУНГ при підготовці бакалаврів за напрямом «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» під час вивчення дисциплін «Екологічна безпека» та магістрів – дисципліни «Глобальні проблеми екології».

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на семінарах і конференціях:

- X Всеукраїнська наукова конференція студентів, магістрів та аспірантів «Сучасні проблеми екології та геотехнологій» (Житомир, 2013);
- Materials of the tenth International research and practice conference «Problems and perspectives of development of world science» (s. Donetsk, 2013);
- Міжнародна наук.-практична конф. «Наука і техніка: виклики сьогодення» (Київ, 2013 р.);
- «Природокористування і сталий розвиток: економіка, екологія, управління» (Ірпінь, 2014 р.);
- Всеукраїнська наук.-практична конф. молодих учених та студентів «Екологічна безпека держави» (Київ, 2014 р.);
- на семінарах кафедр екології та безпеки життєдіяльності ІФНТУНГ (2013-2015 рр.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 16 праць, у тому числі 5 статей – у наукових фахових виданнях України, 2 – у зарубіжних наукових виданнях, 6 – у матеріалах доповідей вітчизняних і міжнародних конференцій, а також отримано 3 патенти.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В РАЙОНАХ РОЗТАШУВАННЯ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ

Газотранспортна система України – одна з найбільших у світі та виконує дві основні функції: забезпечення природним газом внутрішніх споживачів, а також транзит природного газу через територію України в країни Західної та Центральної Європи. Перекачування великих об'ємів природного газу потребує не тільки розвинутої мережі трубопроводів, але й значної кількості компресорних станцій з потужними силовими агрегатами.

Значний вклад у дослідження впливу роботи КС на рівень екологічної безпеки навколишнього середовища, умови праці обслуговувального персоналу внесли О. М. Адаменко, К. С. Борисенко, Д. Велс, Е. Д. Виноградова, С. Вікес, І. Д. Віліс, А. І. Гриценко, В. Я. Грудз, Р. М. Говдяк, І. М. Карп, С. М. Кореа, Є. І. Крижанівський, П. В. Куцина, А. Лефер, О. В. Левченко, Г. М. Любчик, Л. С. Новікова, Г. Є. Панова, С. В. Сантанам, Я. М. Семчук, М. Д. Середюк, А. Д. Сєдих, Я. І. Сігал, О. А. Скріпка, С. Г. Сова, А. Л. Терехов, Д. Ф. Тимків, А. М. Хофф, В. А. Христич, Л. Б. Чабанович, Б. І. Шелковський, А. П. Шицька та інші вітчизняні й зарубіжні дослідники.

Необхідною передумовою створення екологічно-чистого навколишнього середовища районів, де розміщені КС є дослідження рівня забруднення атмосферного повітря газоперекачувальними агрегатами, джерел та особливостей утворення шкідливих речовин під час їх роботи.

До цього часу ще недостатньо вивчені та узагальнені екологічні моделі, що описують основні технологічні процеси газоперекачувальних агрегатів КС, процеси згорання газу в камерах згорання, утворення небезпечних шкідливих викидів та їх розповсюдження за межі КС.

1.1 Характеристика компресорних станцій магістральних газопроводів як екологічно-небезпечних об'єктів

Сучасна КС забезпечує основні технологічні процеси з підготовки та транспортування природного газу за допомогою енергетичного обладнання і є основним елементом у комплексі споруд, які входять до магістрального газопроводу. Саме параметри роботи КС визначають режим роботи газопроводу. Наявність КС дає змогу регулювати режим роботи газопроводу при коливаннях використання газу, максимально використовуючи при цьому акумулювальну здатність газопроводу [1, 2].

Велика кількість шкідливих речовин, що надходять в атмосферне повітря під час роботи КС, у навколишнє середовище під час транспортування природного газу, приводить до суттєвих змін в атмосфері, водоймах, підземних водоносних горизонтах, ґрунтах і рослинах [3, 4, 5]. Отже, при транспортуванні газу найбільш істотними джерелами забруднення біосфери є КС. Для газоперекачувальних агрегатів, що перебувають в експлуатації на компресорних станціях, проблеми зниження токсичності згорання газу не остаточно вирішено [6, 7, 8, 9, 10].

Незважаючи на те, що на частку природних джерел забруднення повітря припадає близько 93 % оксиду азоту, більше ніж 50 % сполук сірки, значна частка оксиду вуглецю й інших забрудників, найбільшу небезпеку становлять штучні джерела забруднення повітря, пов'язані з діяльністю людини, насамперед це процеси згорання палива під час транспортування газу. На відміну від природних, штучні джерела забруднення вирізняються нерівномірністю розподілу, особливо між сільськими та міськими територіями. Великим містам притаманний більш високий вміст забруднювальних речовин у повітрі [11, 12, 13].

Надходження в атмосферне повітря великих обсягів шкідливих речовин від продуктів згорання палива в котлах, промислових пічках змінює склад атмосферного повітря, часто наближуючи концентрацію токсичних речовин до

небезпечних для людей, тварин, рослин, а також призводить до швидкої корозії металів.

Концентрація токсичних речовин обмежується нормативними документами [14]. Основними характеристиками міри забруднення атмосферного повітря є максимально разова і середньодобова гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин в атмосферному повітрі населених пунктів. Максимально разову ГДК речовин в атмосферному повітрі визначають як концентрацію шкідливих речовин, невідчутну для рефлекторних систем людини. У табл. 1.1 наведено ГДК деяких основних забрудників атмосферного повітря.

Таблиця 1.1

Максимально разові і середньодобові ГДК деяких шкідливих речовин в атмосферному повітрі

№ п/п	Викиди	Гранично допустима концентрація (ГДК), мг/м ³	
		максимально разова	середньодобова
1	Діоксид азоту	0,085	0,04
2	Оксид азоту	0,60	0,06
3	Оксид вуглецю	5,0	1,0
4	Сірчаний ангідрид	0,5	0,05
5	Сірководень	0,008	0,008
6	Формальдегід	0,035	0,012
7	Сажа	0,15	0,050
8	Озон	0,16	0,03

З більш як 200 забрудників атмосферного повітря, на які встановлено норми гранично допустимих концентрацій, доцільно виділити п'ять основних: 1) оксиди азоту; 2) оксиди вуглецю; 3) тверді частини (пил, попіл, сажа); 4) оксиди сірки; 5) вуглеводні, які визначаються на 90-98 % валовим викидом шкідливих речовин у більшості міст [15].

Для більшості промислових регіонів характерне таке вагове співвідношення надходження цих речовин в атмосферне повітря: оксид вуглецю близько 50 %, оксиди сірки близько 20 %, тверді частинки – 16-20 %, оксиди азоту – 6-8 %, вуглеводні – 2-5 %. Однак, із урахуванням високої токсичності оксиду азоту (ГДК м.р. = 0,085 мг/м³, порівняно з ГДК м.р. = 0,05 мг/м³ для пилу та сірчаного ангідриду та ГДК м.р. = 5 мг/м³ для оксиду вуглецю), його вміст у забрудненні атмосферного повітря можна оцінити в 30-35 %, після чого слідує оксид вуглецю, оксид сірки та тверді частинки.

Робочий процес ГПА і хімічні реакції при згоранні газу проходять таким чином. Атмосферне повітря через систему фільтрів подається на вхід осьового компресора під тиском 0,5-0,7 МПа, за температури 180-240 °С надходить у камеру згорання, де розділяється на два потоки. Менша частина повітря бере участь у горінні палива, підведеного за допомогою насоса, а більша частина, пройшовши між корпусом і жаровою трубою, слугує для оптимізації процесів згорання палива, охолоджує останню після змішування з продуктами згорання в кінці камери згорання, зменшує температуру до 700-850 °С. З камери згорання газ надходить у турбіну, яка служить для перетворення потенціальної енергії в механічну роботу. Із газової турбіни відпрацьований газ викидається в навколишнє середовище за температури 400-450 °С.

Процес утворення шкідливих речовин проходить у камері згорання в результаті горіння суміші палива з повітрям під великим тиском. При цьому проходять хімічні реакції окислення компонентів палива, яке згорає.

У процесі транспортування природного газу магістральними газопроводами експлуатується значна кількість ГПА з газотурбінним приводом. Основними їх характеристиками є потужність, економічність та екологічність [16]. У камерах згорання крім оксидів вуглецю CO утворюються і оксиди азоту NO і NO₂ та інші сполуки. Для знаходження шляхів зменшення викидів необхідно знати механізм їхнього утворення. Відомі чотири способи утворення оксидів азоту в процесі горіння, які залежать від властивостей палива, конструкції камери згорання [17].

- 1) термічний спосіб (механізм Зельдовича);
- 2) швидке утворення NO_x (механізм Фенімора);
- 3) утворення оксидів через N_2O ;
- 4) утворення оксидів з паливного азоту.

Основним параметром процесу горіння, відповідальним за утворення NO_x , є коефіцієнт надлишку окислювача (повітря).

Основним джерелом появи оксиду азоту NO і діоксиду азоту NO_2 в атмосферному повітрі є згорання палива. Діоксид азоту часто відіграє домінуючу роль, у порівнянні з іншими забрудниками. Під час визначення допустимих концентрацій оксидів азоту потрібно враховувати їхній вплив не тільки на організм людини та навколишнє середовище, але й на зменшення видимості та фотохімічних реакцій в атмосфері [18].

Лернер М. О. [19] дослідив, що під час згорання паливо-повітряної суміші в камерах теплових агрегатів утворюється оксид азоту NO , який термодинамічно більш стійкий за високих температур, ніж вищі оксиди азоту. Виходячи з димової труби і змішуючись із повітрям за 30 с. 30-35 % газу NO переходить у NO_2 . Тому вважають, що оксиди азоту в атмосферному повітрі до 80 % представлені здебільшого NO_2 . Токсичність NO_2 проявляється у подразнювальній дії на слизисту оболонку очей та дихальних шляхів, зменшенні кисневого постачання організму, порушенні дихальних функцій та діяльності центральної нервової системи. Проникаючи в легені, газ NO спричиняє їх пошкодження та набряк.

Крилов Г. В., Подборний Е. Е., Фоміна С. Т. [20] встановили, що під дією сонячної радіації діоксид азоту розкладається на оксид азоту та кисень. Ця реакція спонукає до більшої кількості вторинних функцій, появи активних радикалів і озону. За наявності вуглеводного фону оксиди азоту ініціюють утворення речовин із сильною токсичною дією пероксидацетилнітратів (ПАН) і пероксидбензоілнітратів (ПБН) озону. Внаслідок сумарної дії оксидів азоту, озону і речовин типу ПАН токсичність суміші зростає більш ніж на порядок у

порівнянні з токсичністю вхідних речовин. Крім цього, газ NO_2 має канцерогенні властивості, що роблять його особливо небезпечним для людини.

Ягода П. А., Михайлів В. І., Костів В. В. [21] дослідили закономірності забруднення навколишнього середовища – атмосферного повітря продуктами згорання при транспортуванні газу ГПА типу ГТК-10І. У роботі запропоновано модель у вигляді функції множинної регресії, яка встановлює взаємозв'язок між викидами забруднювальних газів NO_x і витратами $Q_{\text{пг}}$ паливного газу та коефіцієнта надлишку повітря λ :

$$\text{NO}_x = -754,3357 + 67,7218\lambda + 0,0088Q_{\text{пг}}. \quad (1.1)$$

Побудована тривимірна модель (отримане рівняння) дає змогу з великою точністю визначити обсяги викидів оксидів азоту, якщо відомі витрати газу та коефіцієнт надлишку повітря, проводити їх кількісну оцінку лише за даними, що фіксуються автоматичною системою управління агрегатом.

Сігал І. Я. [22] визначив, що оксиди вуглецю становлять близько половини від загальної кількості всіх шкідливих речовин, які поступають в атмосферу при спалюванні палива. Оксид вуглецю – високотоксична речовина і вже за концентрації CO в повітрі 0,01-0,02 % об'єму під час вдихання викликає отруєння, а концентрація 0,2 % від об'єму ($2,4 \text{ мг/м}^3$) через 30 хв призводить до запаморочення. Оксид вуглецю вступає в реакцію з пігментом крові – гемоглобіном, утворюючи карбоксигемоглобін [23, 24, 25].

У роботі [26] Семчук Я. М., Чабанович Л. Б. за результатами багаторічних досліджень роботи КС та їх подальшого узагальнення встановили, що найбільшу кількість забруднювальних речовин протягом року на всіх КС спричиняють продукти згорання природного газу: оксид вуглецю – 53 %, оксиди азоту – 24,5 %. Наступним за величиною річних викидів є природний газ метан+одорант – суміш природних меркаптанів – 22,3 %. Всі інші забруднювальні речовини від допоміжного обладнання складають величину 20 % (рис. 1.1).

1.1 Особливості утворення джерел забруднення під час роботи компресорно-чужальних агрегатів

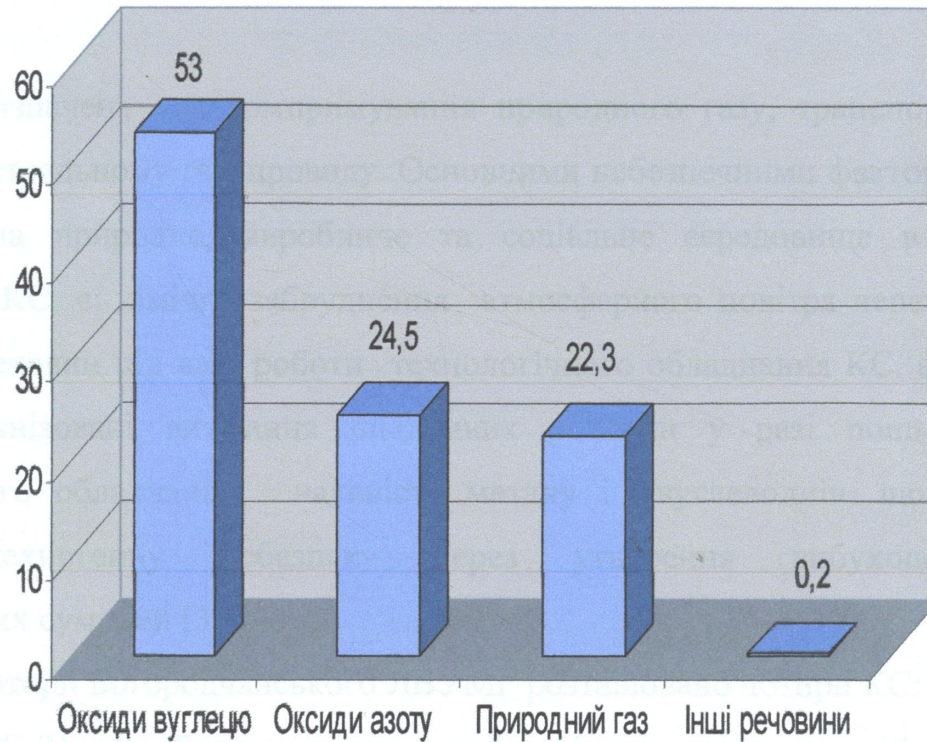


Рис.1.1. Склад викидів від компресорних станцій

Кярчес А. А. [27] встановив, що екологічна проблема в районі розташування КС поглиблюється ще й тим, що такі шкідливі речовини як діоксид вуглецю можуть бути в атмосфері 5-10 років; оксиди азоту – 2,5-4 роки; оксид вуглецю – 0,2-0,5 року; метан – 4-7 років. Ці речовини призводять до таких негативних явищ як кислотні дощі, парниковий ефект, а метан руйнує озоновий шар в атмосфері. Забруднення атмосфери оксидами азоту призводить також до передчасного руйнування машин, матеріалів покриття, завдає шкоди рослинам і зменшує прозорість атмосфери [28-31].

Отже, подальші дослідження негативного впливу шкідливих речовин, що утворюються під час роботи КС, на навколишнє середовище мають важливе значення.

1.2 Особливості утворення джерел забруднення під час роботи газоперекачувальних агрегатів

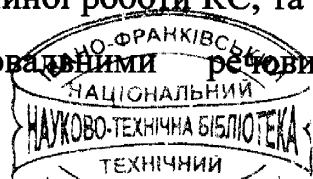
КС призначена для компримування природного газу, транспортування його по магістральному газопроводу. Основними небезпечними факторами, що впливають на природне, виробниче та соціальне середовище в процесі експлуатації КС, є: хімічне забруднення атмосферного повітря через викиди шкідливих речовин під час роботи технологічного обладнання КС, а також через неорганізовані витікання шкідливих речовин у разі пошкодження технологічного обладнання, наявність метану і вуглеводнів, що можуть створити техногенну небезпеку через утворення вибухопожежних газоповітряних сумішей [32].

На території Богородчанського ЛВУМГ розташовано чотири КС:

- КС-21, що обслуговує газопровід «Союз», компресорний цех (КЦ) обладнаний 7 ГПА ГТК-10-І;
- КС-39, що обслуговує газопровід «УПУ», КЦ обладнаний 3 ГПА ГТК-25-І;
- КС-7, що обслуговує газопровід «АЧБ», КЦ обладнаний 6 ГПА СТД-40000(електропривідні);
- КС-39 П, що обслуговує газопровід «Прогрес», КЦ обладнаний 3 ЕГПА -25 (електропривідні).

Природний газ із магістрального газопроводу на КС потрапляє в пиловловлювачі, там очищується від механічних домішок і надходить в компресорні цехи, де відбувається його стиснення та охолодження в апаратах повітряного охолодження, і подається в магістральний газопровід для транспортування.

Основними джерелами утворення забруднювальних речовин на КС є також технологічне обладнання [16, 33], використовуване для забезпечення безперебійної роботи КС, та паливовикористовувальне обладнання. Основними забруднювальними речовинами, які утворюються під час роботи



технологічного обладнання, є складові природного газу та продукти його згорання. Виділення газу обумовлене епізодичними технологічними операціями, передбаченими технічним регламентом (продування апаратів, газопроводів, і т. д.). Виділення продуктів згорання обумовлене роботою газоперекачувальних агрегатів, котлоагрегатів, вогневих підігрівачів газу. Більшість утворених забруднювальних речовин потрапляють в атмосферу через організовані джерела викиду. Джерелами викидів забруднювальних речовин на промайданчику КС Богородчани Богородчанського ЛВУМГ є:

- ГПА (10 шт), де відбувається згорання газу;
- свічі розвантаження контурів компресорів (19 шт), через які в атмосферу стравлюється природний газ (метан) під час їх зупинки;
- свічі, через які в атмосферу стравлюється газ під час продування технологічного обладнання: пиловловлювачів фільтр-сепараторів, адсорберів;
- свічі стравлювання колектора паливно-пускового газу;
- свічі стравлювання колектора пілотного газу;
- свічі маслобака, картера підшипника;
- підігрівачі газу;
- котельні;
- котел газорозподільчальної станції;
- резервуари оливи, бензину, дизпалива;
- ємності метанолу, етленгліколю та інші.

Окрім технологічного обладнання на промайданчику є столярні майстерні, призначені для виконання ремонтних робіт і обладнані газопилоочисними установками. Від металообробних верстатів мехмайстерні в атмосферне повітря через дефлектор – неорганізоване джерело викиду, відводяться аерозолі емульсора. У механічній майстерні на промайданчику КС-39 є металорізальний верстат, обладнаний пиловловлювачем закритого типу. Пил абразивно-металевий збирається в контейнер, тому викиду в атмосферне повітря немає.

У табл. 1.2 представлено основні джерела виникнення та етапи технологічних процесів, під час яких утворюються забруднювальні речовини КС-21 газопроводу «Союз» Богородчанського ЛВУМГ [34].

Таблиця 1.2

**Джерела утворення забруднювальних речовин КС-21 газопроводу
«Союз» Богородчанського ЛВУМГ**

Джерело утворення	Вид технологічного процесу	Найменування забруднювальної речовини
Вихлопна шахта ГПА ГТК-10	Спалювання	Діоксид азоту, оксид азоту, оксид вуглецю, неметанові леткі сполуки, діоксид вуглецю, оксид і діоксид азоту
Контур нагнітача, колектор пускового газу, вал ротора нагнітача	Стравлювання, продування, вивітрювання	Метан
Картер підшипника, маслобак	Вивітрювання	Масло нафтове (веретенне, машинне, циліндрове)
Комунікації КС, ГПА, осушка газу	Стравлювання, продування	Метан
Підігрів газу, турбогенератор Solar	Спалювання, продування	Діоксид азоту, оксид вуглецю, діоксид вуглецю, неметанові леткі сполуки

Отже, основними забруднювальними речовинами, які викидають в атмосферне повітря стаціонарні джерела викиду КС Богородчанського ЛВУМГ, є оксиди азоту і вуглецю, що утворюються під час згорання природного газу і потрапляють в атмосферне повітря через труби ГПА, водогрійні котли ГПА, та метан, який стравлюється зі свічок під час продування технологічного обладнання КС. Згідно з технологічним регламентом станції, одночасно працює не більше ніж 5 ГПА на КС-21 газопроводу «Союз», не більше ніж 2 ГПА на КС-39 газопроводу «УПУ», не більше ніж 4 ГПА на КС-7 газопроводу «АЧБ» та не більше ніж 2 ГПА на КС-39 газопроводу «Прогрес». При цьому кожен ГПА працює не більше ніж 8 місяців на рік. Водогрійні котли працюють виключно в опалювальний період, а ГПА – за необхідністю, залежно від відбору газу споживачами. Всі викиди метану є залповими. Час роботи джерел залпових викидів метану за рік

становить декілька хвилин. Час роботи цих джерел визначається часом звільнення комунікацій та обладнання від метану для їх планово-попереджувальних ремонтів.

Від вентиляційних витяжних труб на зварювальних дільницях в атмосферне повітря викидаються оксид заліза, марганець, флориди, флористий водень, кремній, від столярної майстерні – пил деревини. Через дефлектори в атмосферне повітря потрапляють аерозолі емульсора.

Під час роботи аварійних турбогенераторів «Solar» КС-21 газопроводу «Союз» і «Ruston» КС-39 газопроводу «Уренгой-Помари-Ужгород» в атмосферне повітря викидаються оксиди азоту і вуглецю, що утворюються під час згорання природного газу.

Пари вуглеводнів (бензин, дизпаливо), оливи, метанолу, етиленгліколю при їх зберіганні, потрапляють в атмосферне повітря через дихальні клапани резервуарів.

Неорганізованими джерелами викиду є: дефлектор механічної майстерні, дефлектор слюсарної майстерні, заправні колонки з бензином і дизпаливом, зварювальний пост на вулиці та відкрита автостоянка.

Транспортування газу магістральними газопроводами на території КС та в цехах спричиняє шумове забруднення внаслідок роботи енергетичного обладнання, що негативно впливає на обслуговувальний персонал [35, 36]. Тривала дія шуму негативно впливає на стан нервової системи працюючих. Дослідження рівнів шуму показали, що джерелами шумового забруднення є камера забору повітря та процес всмоктування газотурбінної установки з рівнем звукової потужності 100..115 дБ, шахта вихлопу 100..140 дБ, технологічна обв'язка трубопроводів 100..120 дБ, а приміщення машинного залу ГПУ – 115..130 дБ [37]. Проаналізовані рівні шумового забруднення на різних ділянках території КС газопроводу «Союз» дозволили сформулювати напрямки досліджень для боротьби з шумом на базі сучасних методів моделювання технологічних режимів роботи обладнання із залученням засобів обчислювальної техніки.

Всього із джерел викиду на промайданчику КС Богородчани Богородчанського ЛВУМГ в атмосферне повітря потрапляє 22 інгредієнти забруднювальних речовин [38].

Величини фонових концентрацій забруднювальних речовин Богородчанського ЛВУМГ зазначені в табл. 1.3. Фонова концентрація – це концентрація наявних у повітрі, воді чи ґрунті шкідливих домішок на певний час на певній території. За результатами розрахунків визначають величини фонових концентрацій забруднювальних речовин [39, 40].

Таблиця 1.3

**Величини фонових концентрацій забруднювальних речовин
Богородчанського ЛВУМГ**

Найменування забруднювальних речовини	Концентрація, мг/м ³
діоксид азоту	0,008
марганець та його сполуки	0,004
оксид вуглецю	0,4
сірчана кислота	0,12
сажа	0,06
пари дизпалива (вуглеводні C ₁₂ -C ₁₉)	0,4
оксид заліза	0,016
пил деревини	0,04
фтороводень	0,008
пил абразивний	0,016
пил металевий	–
пил абразивно-металевий	0,16
метан	20,0
спирт метиловий	0,4
діетиленгліколь	0,08
натрію карбонат	0,016
натрію гідроксид	0,004
кальцію оксид	–
кальцію гідроксид	0,02
кальцію карбонат	0,02
діоксид сірки	0,02
хром шестивалентний	0,0006
діоксид кремнію	0,008
фтористі газоподібні сполуки	0,008
масло мінеральне нафтове	0,002
бензин нафтовий	2,0

Існуючі газоочисні установки дозволяють знешкоджувати технологічні та вентиляційні викиди без, або з подальшою утилізацією вловлених домішок [41]. Для реалізації завдань захисту атмосфери від шкідливих викидів застосовують шість основних методів: абсорбція; адсорбція; хемосорбція; термічна нейтралізація; каталітичне знешкодження; хімічне знешкодження [41, 42]. За допомогою цих методів можна тільки частково зменшити концентрацію шкідливих речовин в атмосферному повітрі. Тому вивчення основних джерел забруднення на Богородчанському ЛВУМГ та методів і заходів захисту атмосфери має важливе значення.

1.3 Основні причини та екологічні наслідки відмов на компресорних станціях

Надзвичайно великий рівень забруднення навколишнього середовища спостерігається під час роботи КС, якщо виникають аварійні ситуації.

Під аварією на КС, ГРС мають на увазі аварію, що відповідає V-ій категорії аварійної відмови – розрив технологічного трубопроводу на повний перетин або руйнування посудини, апарата, елемента, ГПА, небезпечної речовини із запаленням або без запалення.

Аварійні відмови на КС, ГРС можна умовно поділити на 6 категорій [43]:

5 – аварія з високим матеріальним збитком і екстреною зупинкою КЦ, КС, ГРС;

4 – аварійна зупинка КЦ (КС), ГРС;

3 – позапланова зупинка КЦ (КС), ГРС для усунення дефектів;

2 – зупинка ГПА;

1 – дефект, який усувають під час планової зупинки цеху або агрегату;

0 – дефект, що не впливає на роботу й перебуває під контролем.

Дані про пожежі та аварії на об'єктах транспортування газу є обмеженими внаслідок того, що ці об'єкти мають стратегічне значення й інформація про надзвичайні ситуації на них не розповсюджують.

Середньорічний рівень аварійності складає 50-60 неполадок на рік [44]. Для локалізації та попередження аварійних ситуацій на КС та встановлення обов'язків працівників при виникненні аварійних ситуацій [45] необхідні знання особливостей технологічних процесів. Під час експлуатації можуть виникнути умови, які викликають нестабільну роботу агрегатів. За дослідженнями Мікаеляна Є. А. [46] основними причинами нестабільної роботи газотурбінних газоперекачувальних агрегатів КС є: граничні межі роботи агрегатів, утворення автоколивань у проточній частині (флатер), перевищення допустимих значень механічних параметрів:

- у з'єднаннях між рухомими та нерухомими частинами вузлів агрегатів: підшипниках, ущільненнях та ін.;
- віброхарактеристик;
- характеристик неврівноваженості;
- відношеннях критичної частоти обертання в робочій частині обертання роторів агрегату.

На КС основними причинами відмов і факторами, що сприяють їхньому виникненню, є (у порядку зменшення) [47-49]:

- підвищена вібрація трубопроводів, а також осідання трубопроводів і опор;
- дефекти виготовлення устаткування (у першу чергу фасонних частин і арматури);
- брак будівельно-монтажних робіт;
- корозія й зношування.

Пожежна безпека різних ГПА неоднакова. Найбільшою пожежною небезпекою характеризуються ГПА з газотурбінним приводом. Менш пожежонебезпечними є ГПА з газомоторним та електроприводами [50-52], причинами виникнення відмов на яких є:

- наявність місць з ускладненою технологією виготовлення і проведення будівельно-монтажних робіт, погіршеного контролю якості зварних швів з підвищеною концентрацією напруги;

– велика кількість переходів трубопроводів з підземного положення в надземне, що є місцями підвищеної корозійної активності та концентрації напруги;

– складне просторове прокладання надземних трубопроводів обв'язки компресорних агрегатів з великою кількістю жорстких і ковзаючих опор, в поєднанні зі значними змінними температурними та газодинамічними (вібраційними) навантаженнями з боку нагнітача.

Для аналізу аварійності КС необхідно виявити елементи технологічного устаткування, які найбільш схильні до відмов [53, 54].

Найбільш тяжкі наслідки пов'язані з руйнуванням елементів компресорних установок і наступним витіканням газу. Безпосередніми причинами відмов і вибухів компресорних установок, як показує практика, можуть бути:

- надмірне підвищення температури стиснутого повітря та перегрівання частин компресорної установки;
- вологість засмоктаного газу;
- розряди статичної електрики;
- швидке підвищення тиску газу в компресорній установці вище від допустимого;
- неправильний монтаж компресорної установки;
- неправильна експлуатація компресорної установки і незадовільний догляд за нею.

Відповідно до того принципу, що і для усього комплексу устаткування і агрегатів КС, виконано статистичний аналіз основних причин відмов технологічних трубопроводів (рис. 1.2) [55].

Як бачимо з рис. 1.2 найбільша кількість аварій (37 %) припадає на підземні трубопроводи, зокрема на трубопроводи обв'язки.

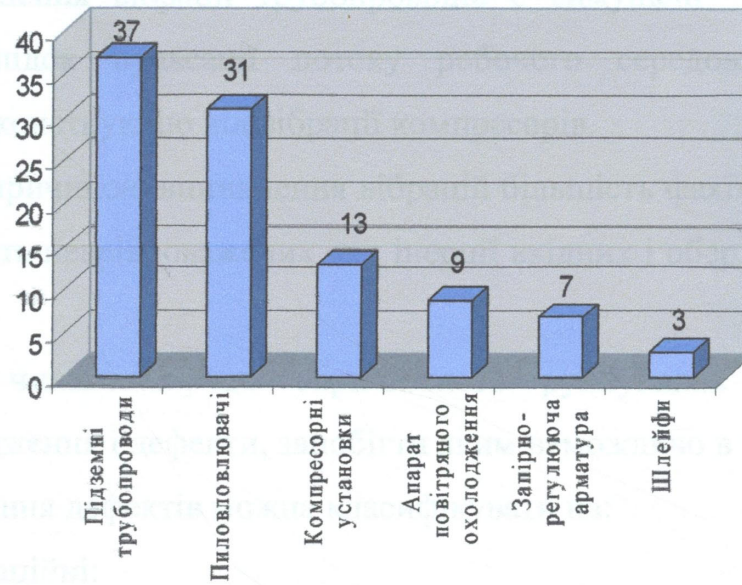


Рис. 1.2. Розподіл дефектів вузлів технологічного обладнання

Найбільш потенційно небезпечним елементом на КС є технологічна обв'язка ГПА, яка являє собою складну просторово-стрижневу конструкцію з багаторазовими вигинами й великою кількістю твердих і ковзаючих опор, що зазнає змінних навантажень з боку нагнітача. Просторові вигини труб на територіях КС є також на численних переходах надземних ділянок у підземні.

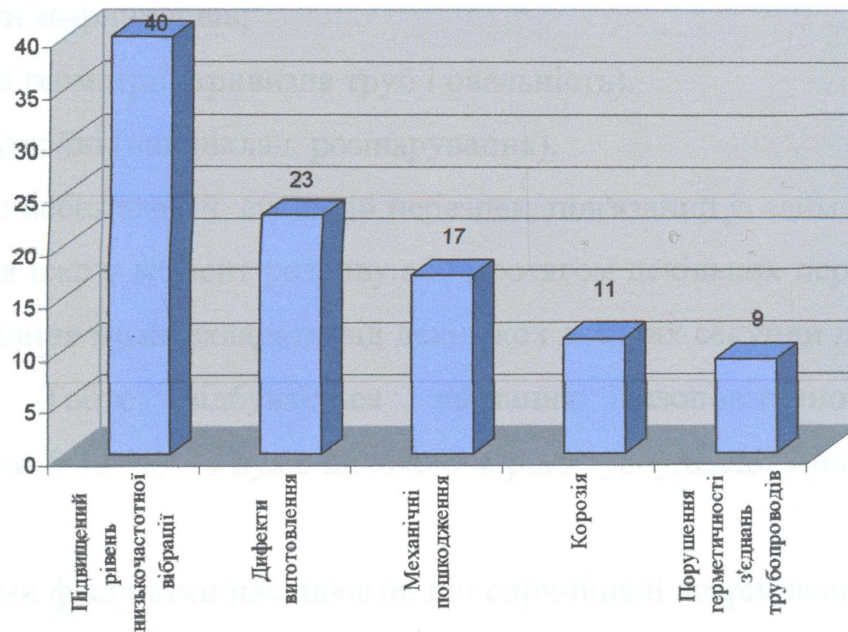


Рис. 1.3. Основні причини відмов технологічних трубопроводів

Як показано на рис. 1.3, більшість відмов, пов'язаних з розгерметезацією трубопроводів-гітар на КС, відбуваються в результаті підвищеної вібрації.

Джерелом виникнення вібрації трубопроводів є вимушені коливання, що виникають внаслідок пульсації потоку робочого середовища, а також механічної дії на конструкцію від вібрації компресорів.

Основною причиною виникнення вібрацій більшість фахівців на сьогодні вважають наявність неврівноважених сил інерції вхідних і обертально-рухомих мас [56, 57].

Основними чинниками, що спричиняють руйнування газопроводів, є поверхневі ушкодження і дефекти, запобігти яким неможливо в повному обсязі. Причини виникнення дефектів можна класифікувати на:

1. Експлуатаційні:
 - корозійні (загальна корозія - втрата металу до 80 % від товщини стінки труби);
 - стрес-корозійні;
2. Механічні ушкодження.
3. Будівельні:
 - дефекти поверхні (подряпина, задир та ін.);
 - дефекти зварних швів;
 - дефекти геометрії (кривизна труб і овальність).
4. Металургійні (наприклад, розшарування).

Найбільш небезпечний сценарій небезпек, пов'язаний із займанням газу у разі виникнення іскр у момент розриву або протягом декількох перших секунд (затримка загорання може складати від декількох десятих секунди до декількох секунд) [58]. Тобто відбувається займання газоповітряного потоку (з концентрацією 5-15 %) з дуже високою мірою турбулізації і неоднорідною структурою.

Зовнішніми фізичними наслідками, що спричинені аварійними розривами газопроводів, є:

- утворення первинної ударної хвилі стискування внаслідок розширення в атмосфері природного газу, викинутого з об'єму «миттєво»

зруйнованої частини трубопроводу, а також вторинних хвиль стискування, які утворюються при займанні газового «шлейфу» і розширенні продуктів горіння;

- утворення і розлітання уламків (фрагментів) зруйнованої ділянки трубопроводу;

- термічна дія пожежі на людину і довкілля при займанні витікаючого газу;

- токсична дія транспортованих складових продукту на живі організми.

КС є найнебезпечнішою складовою газотранспортних підприємств. Водночас на КС основний ризик виникнення вибухів і пожеж пов'язаний з експлуатацією ГПА [59]. Небезпека виникнення пожеж на КС визначається, передусім, фізико-хімічними властивостями природного газу, який за недотримання певних вимог безпеки вибухає, запалюється і призводить до техногенної аварії, пов'язаної з поширенням пожежі. У Болгарії в районі КС Странджа, яка розташована в 800 метрах від кордону з Туреччиною, стався потужний вибух, що спричинило виникнення пожежі [60].

Як показує статистика і досвід експлуатації КС [61, 62], серед основних причин виникнення пожеж на КС можна виділити:

- займання масла в компресорному цеху під час розриву маслопроводів і його потрапляння на гарячі поверхні газоперекачувального агрегату;

- руйнування обв'язувальних газопроводів компресорного цеху;

- потрапляння сторонніх предметів у порожнину нагнітача;

- потрапляння займистих речовин через нещільність у запірній арматурі;

- порушення технологічного процесу, недотримання правил пожежної безпеки обслуговувальним або експлуатаційним персоналом (людський чинник).

При експлуатації КС [63] може статися вибух, основними причинами якого є:

- неправильний монтаж, незадовільне обслуговування і експлуатація;
- перегрівання стінок компресора внаслідок значного підвищення температури стисненого повітря;
- порушення роботи системи змащування, низька якість мастильних речовин, загорання і вибух парів змащувальних речовин, самоспалахування газоповітряної суміші;
- перевищення допустимого тиску;
- засмоктування забрудненого повітря;
- накопичення нагару, відкладання оксидів заліза на холодних частинах системи;
- несправність контрольного манометра, запобіжних клапанів та інших приладів безпеки;
- виникнення зарядів статичного струму на корпусі при інтенсивному витрачанні стисненого повітря.

Найбільш поширеною причиною відмов компресорів є підвищення розрахункового тиску і температури, що призводить до зміни структури металу, порушення його механічної цілісності, а відтак і до вибуху [64]. Наприклад, 11 липня 2012 у Краснодонській дотискній КС в селі Копанка Балаклеївського району Харківської області стався вибух на газокompресорній станції. Аварія сталася, коли газівники почали планові роботи з обслуговування агрегату (при введенні машини в робочий режим після ремонту). Виник несанкціонований непередбачуваний витік газу в одному з циліндрів компресорного агрегату номер два цеху першого ступеня, після чого стався вибух [65].

Можливі варіанти виникнення відмов на КС представлені у табл. 1.4. Причини аварійних відмов устаткування на ГРС практично ті ж, що й на КС.

Розгерметизація устаткування усередині приміщень блока редукування й обліку витрати газу може призвести до їхньої загазованості й до вибуху газу усередині цих приміщень.

Таблиця 1.4

Типові аварійні ситуації на компресорних станціях

Опис ситуації	Спосіб виявлення	Можливі причини
1. Різде падіння тиску газу на вході КС.	1. За показами приладів, установлених на КС і щитах керування ГПА. 2. За змінами рівня звуку працюючих ГПА	1. Розрив лінійної частини газопроводу до крана. 2. Мимовільне закриття охоронного крана або лінійного крана.
2. Різде падіння тиску газу на вході КС.	1. За показами приладів, установлених на КС і щитах керування ГПА. 2. За змінами рівня звуку працюючих ГПА	Розрив лінійної частини газопроводу після крана.
3. Розрив газопроводу й витікання газу на території КС.	1. За характерним звуком витікання газу. 2. За показниками приладів.	Ушкодження газопроводу.
4. Пожежа на технологічних установках і на комунікаціях КС.	1. Візуально. 2. Спрацювання системи сигналізації про пожежу.	1. Розрив газопроводу з іскроутворенням. 2. Витік газу з проникненням у щит місцевого керування установками. 3. Несправність електропроводки. 4. Замикання з іскроутворенням.
5. Пожежа у відсіках ГПА блокового виконання.	1. Спрацювання захистів. 2. Візуально.	1. Витік газу у відсіках ГТУ й нагнітача з наявністю іскроутворення. 2. Потраплення газу у відсік блока автоматики при іскроутворенні. 3. Потраплення масла на гарячу поверхню ГТУ, викидну шахту. 4. Наявність конденсату.
6. Пожежа в машинному вузлі.	1. Спрацювання сигнальних табло. 2. Візуально.	1. Наявність витоків масла або парів масла на гарячих поверхнях ГТУ. 2. Наявність витоків газу з іскроутворенням. 3. Коротке замикання в системі електропостачання й системі автоматичного управління.
7. Пожежа у відсіку нагнітача	1. Спрацювання сигнальних табло. 2. Візуально.	1. Відмова системи ущільнення масло – газ. 2. Руйнування деталей і вузлів нагнітача з іскроутворенням за наявності витоків газу або парів масла.

Опис ситуації	Спосіб виявлення	Можливі причини
8. Розрив мастилопроводів, витік масла на ГПА	1. Візуально. 2. Спрацювання захисту щодо падіння тиску масла або температури підшипників.	Розрив мастилопроводів, нещільність фланцевих і муфтових з'єднань.
9. Розрив трубних проводок і витік газу на ГПА.	1. Спрацювання захисту щодо загазованості. 2. За показниками переносних газоаналізаторів.	Нещільність фланцевих і муфтових з'єднань, ушкодження або розрив трубних проводок.

У роботах [59, 66-68] розглянуто причини виникнення аварійних ситуацій на об'єктах транспортування газу та їх наслідки для навколишнього середовища. Вченим запропоновано шляхи запобігання виникнення аварійних ситуацій на магістральних газопроводах, мінімізації ризиків їх виникнення, оперативної ліквідації екологічних наслідків відмов.

1.4 Шляхи зменшення викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря

Основними напрямками зниження токсичності продуктів згорання в пальникових системах різного призначення є: застосування підвищених надлишків повітря (В. А. Христич [69], Г. Н. Любчик [70], Н. К. Ріск [71]); використання стадійного горіння (І. Я. Сігал [72], А. Г. Тумановский [73], А. Лефер [74]); гомогенізація зони горіння (Г. Леонард [75], С. М. Кореа [76]); застосування мікрофакельного горіння (С. Д. Сердюк [77], А. М. Маркушин [78]); застосування каталітичних технологій горіння (Г. Н. Любчик [79], С. Вілкес [80]).

Результати випробувань пристрою фірми Solar (у складі камери згорання ГПА типу ГТК-10І) [81] показали, якщо збільшується надлишок повітря вище від зазначеного рівня, то різко зростає емісія СО. Якщо коефіцієнт надлишку повітря $\alpha \rightarrow 2,0$, то концентрація СО у продуктах згорання, приведена до $O_2 = 15 \%$, досягає 100 мг/м^3 , що може бути причиною підвищеної хімічної неповноти згорання палива, а внаслідок зменшення надлишку повітря нижче

від зазначеного рівня не тільки істотно зростає емісія NO_x і CO , але й виникають проблеми, пов'язані з появою вібраційного горіння, вибухом і нестабільністю полум'я. Фірми, що використовують дану технологію (Solar, Rolls-Royce, Siemens та ін.), усувають даний недолік за допомогою складних систем регулювання складу суміші в зоні горіння, застосування змінної геометрії камер згорання і проточної частини компресора.

Математичне моделювання робочих процесів у камерах згорання розглядаємо як один із перспективних методів, який дозволяє зменшити вартість дослідних робіт. Зокрема, розроблено математичну модель [82] тривимірних хімічно реагуючих потоків, яка дає можливість прогнозувати вихідні температурні й екологічні характеристики камер згорання, що працюють на газоподібному паливі.

Горбійчук М. І., Щупак І. В. [83] пропонують технічний стан та ГТД характеризувати коефіцієнтом корисної дії (ККД), який визначали методом енергетичних балансів за методикою [84, 85]. Емпіричну модель шукають у вигляді полінома n степеня:

$$y = \sum_{i=0}^{z-1} a_i \prod_{j=1}^n x_j^{S_{ji}}, \quad (1.2)$$

де y – одне із значень M_i , $i=1,4$; x_j , $j=1,2$ – відповідно $x_1=q$, $x_2=n$; z – кількість членів полінома; S_{ji} – степені аргументів, які повинні задовольняти обмеження

$$\sum_{j=1}^n S_{ji} \leq m.$$

В основі моделювання лежить метод найменших квадратів, котрий дозволив отримати емпіричну модель у вигляді полінома, що дозволяє прогнозувати потужність викидів оксидів азоту NO_x та оксиду вуглецю CO .

У роботі [86] досліджено екологічну ситуацію, що склалася в районах довготривалої експлуатації КС магістральних трубопроводів. Учені побудували карти сумарних показників забруднення атмосферного повітря, поверхневих

вод, ґрунтового покриву. Встановлено, що поблизу об'єктів трубопровідного транспорту газу сконцентровано підвищений вміст важких металів у ґрунтах. Автори вважають, що це наслідки залишкового забруднення будівництва об'єктів транспортування газу, а не їх експлуатації.

Горюнкова А. А. та Галунова Д. В. [87] оцінили вплив об'єктів газової промисловості на довкілля. Автори зазначають, що найбільші негативні екологічні зміни навколишнього середовища відбуваються на родовищах нафти і газу та в районах розташування магістральних газопроводів. Безпосередній та опосередкований вплив здійснюється практично на всі компоненти довкілля. Зокрема, в районі розташування КС концентрації забруднювальних речовин можуть перевищувати гранично допустимі концентрації у 40-60 разів на відстані до 500 м від джерела викидів. Учені роблять висновок про те, що за сучасного рівня розвитку газотранспортних систем повністю уникнути шкідливого впливу на довкілля не можливо. Виходячи з цього, в процесі експлуатації об'єктів транспортування газу, і важливим завданням є мінімізація негативних впливів на навколишнє середовище.

Говдяк Р. М. [88] проаналізував основні аспекти роботи КС, на основі яких встановлено, що коефіцієнт корисної дії газоперекачувального агрегату є низьким, що спричиняє утворення значної кількості речовин, які в даний час забруднюють навколишнє середовище. Учений запропонував використання вуглекислого газу як реагент, що витісняє вуглеводні з пластів, використання CO_2 для виготовлення вуглекислоти, утилізацію надлишкового тиску та температури викидних газів.

У роботі [89] автори розглядають камеру згорання ГТУ як автоколивальну систему загального виду, джерелом енергії коливань якої є енергія палива, що виділяється під час його окислення. Автори побудували математичну модель камери згорання, на основі якої розглянуто можливості динамічної стійкості камери згорання з попереднім змішуванням палива. У результаті проведених досліджень встановлено, що суттєвий вплив на стійкість

спалювального пристрою до термоакустичних коливань, зумовлених змінами параметрів паливної суміші, мають геометричні параметри змішувача. Розроблено паливні пристрої для різних довжин жарових труб, що забезпечують стійке низькоемісійне спалювання газу.

Математичне моделювання процесів вібраційного горіння у камерах згорання газотурбінних двигунів виконано у роботі Герасименка В. П. та Налесного Н. Б. [90]. Учені вивчали джерела, механізми та умови виникнення коливальних процесів у малоемісійних камерах згорання газотурбінних двигунів газоперекачувальних агрегатів. У результаті проведених досліджень встановлено, що в камерах згорання існує декілька джерел виникнення вібраційного горіння. Основною з причин низькочастотного горіння є періодичні зміни надходження палива до камери згорання через форсунки, наслідком чого є періодичність утворення тепла. Пульсації при високочастотному горінні зумовлені турбулентністю потоку, акустичними коливаннями тиску, коливаннями густини.

Іноземцев А. А. та Токарев В. В. [91] запропонували два напрямки технології низькоемісійного спалювання газу в камері газотурбінного двигуна. Перший напрямок передбачає використання камери згорання з тристадійною технологією горіння: «багате» горіння – різке розведення – «бідне горіння», що дозволяє забезпечити низький рівень емісії оксидів азоту. Другий напрямок передбачає комбіноване горіння: «багате горіння» – різке розведення - «бідне горіння», що переходить у бідне горіння попередньо перемішаної суміші. Другий напрямок дозволяє зменшити емісію оксиду вуглецю.

На основі літературних даних [92] досліджено процеси утворення оксиду вуглецю та оксидів азоту в камерах згорання газотурбінних двигунів. На основі проведених досліджень запропоновано систему низькоемісійного спалювання газу, яка базується на зменшенні утворення оксидів азоту за рахунок спалювання в низькоемісійній камері та мінімізацію утворення оксиду вуглецю за рахунок його нейтралізації шляхом каталітичного доокислення. Запропонований каталітичний нейтралізатор має ресурс експлуатації 3000

годин, що відповідає ресурсу ГТУ, тобто його можна замінити під час проведення ремонтних робіт на установці.

Варламов Г. Б. та Приймак Е. А. [93] дослідили фактичні характеристики обладнання КС. Запропонували методика оптимізації завантаження обладнання, завдяки якій вирішується ряд важливих технологічних проблем. Зокрема, методика дозволяє в реальному часі оцінити ймовірність виникнення нестандартних і аварійних ситуацій та ризики відмов основного й допоміжного обладнання. Оптимізація технологічних процесів дозволяє зменшити ремонтні та експлуатаційні затрати. З точки зору екологічної безпеки оптимальні режими роботи та завантаження обладнання дозволяють перекачати максимальні обсяги газу, залишаючи при цьому стабільні обсяги викидів, тобто питомі обсяги викидів забруднювальних речовин на одиницю перекачаної продукції зменшуються.

Варламов Г. Б., Позняков П. О., Юрашев Д. М. [94] до основних чинників, що є причиною утворення значної кількості викидів забруднювальних речовин під час роботи, пропонують відносити:

- нерівномірність температур та швидкостей;
- якість сумішеутворення;
- аеродинамічний опір фронтального пристрою реєстрового типу повітряному потоку.

На думку вчених, перелічені фактори суттєво впливають на якість спалювання газу, що є причиною утворення забруднювальних речовин – продуктів неповного згорання газу.

У роботі [95] проаналізовано результати дослідження особливостей спалювання газу в камерах згорання ГПА, зокрема технології низькоемісійного спалювання газу, та зроблено висновок про те, що на сьогодні механізми утворення оксидів азоту вивчено недостатньо. Зміна одного і того ж фактора, що впливає на спалювання газу, може по-різному впливати на обсяги утворення оксидів азоту та вуглецю. У роботі зазначено, що на сьогодні відомо багато способів пригнічення реакцій утворення оксидів азоту, проте через певні

специфічні особливості їх важко реалізувати на практиці. Зокрема такі методи можуть суттєво впливати на експлуатаційні характеристики газоперекачувального агрегату. Автори запропонували технологію трубчатого спалювання газу як спосіб зменшення обсягів утворення оксидів азоту та вуглецю. На думку авторів, така технологія може в перспективі стати основою для конструювання камер згорання нових газотурбінних двигунів та модернізації тих, які на даний час використовують для перекачування газу в магістральних трубопроводах.

Лещенко І. Ч. [96] визначив основні екологічні аспекти зменшення викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря газотранспортною системою України. Автор дійшов до висновку, що існуюча структура і парк ГПА України є значним джерелом викидів забруднювальних речовин та парникових газів. У той самий час учений зазначає, що технічний стан та рівень розвитку обладнання має значний потенціал до оновлення й модернізації, наслідком яких буде суттєве зменшення емісії оксидів азоту та вуглецю, а також підвищення коефіцієнта корисної дії агрегатів. Як основні напрямки зменшення викидів забруднювальних речовин автор пропонує:

- оновлення компресорного обладнання;
- використання газу, що викидається під час продування обладнання в системі подачі паливного газу;
- комп'ютеризація систем оперативної діагностики ГПА;
- керування режимами роботи ГТС з урахуванням поточного технічного стану компресорного обладнання.

Левченко О. В. [97, 98] вважає, що одним із перспективних напрямків роботи, пов'язаних зі зниженням шкідливості відпрацьованих газів ГТУ, є впровадження каталітичного способу їх очищення. В основу цього методу запропоновано покласти гетерогенно-каталітичну реакцію, в якій токсичні оксиди азоту за наявності відновника вступають у реакцію на поверхні каталізатора в результаті чого шкідлива речовина розкладається на нетоксичні сполуки. На основі проведених досліджень й удосконалення цього методу

можна прогнозувати ступінь очищення викидного газу від оксидів азоту, підвищити екологічну надійність на територіях та поліпшити стан атмосферного повітря в районі розташування КС.

Для вивчення зниження концентрації газів у викидних газах ГТУ автор провів дослідження на стенді, що складається з газозабірної камери, в яку подавалися викидні гази повітряного компресора та каталітичного пристрою. Каталітичний пристрій складався з 5 трубок діаметром 25 мм, розміщених під шаром каталізатора, через які подається викидний газ. Концентрація оксидів азоту визначалась газоаналізатором TESTO-350. За дослідженнями перебігу гетерогенних каталітичних реакцій встановлено активне зниження концентрацій NO та NO₂ на досліджуваних поверхнях з матеріалів Fe₂O₃, Cu₂O, NiO. Найбільш активне зниження концентрації спостерігалось при використанні каталізатора NiO.

За результатами теоретичних досліджень багатьох вітчизняних та зарубіжних учених встановлено основні причини й наслідки негативного впливу певних чинників на рівень екологічного забруднення атмосферного повітря під час роботи КС.

Отже, основними небезпечними чинниками, що впливають на природне, виробниче та соціальне середовище під час експлуатації КС, є:

- хімічне забруднення атмосферного повітря, внаслідок викидів шкідливих речовин технологічним обладнанням КС;
- хімічне забруднення виробничого середовища, в т. ч. робочої зони, внаслідок неорганізованих витоків шкідливих речовин у разі пошкодження технологічного обладнання;
- наявність вибухо- і пожежонебезпечних речовин (метан, вуглеводні), що можуть створити техногенну небезпеку під час утворення вибухопожежних газоповітряних сумішей.

Як показали досвід експлуатації КС та проведені теоретичні дослідження, для зменшення шкідливого впливу на екологічну безпеку атмосферного повітря, розробки необхідно проводити у таких напрямках:

- заміна застарілих газоперекачувальних агрегатів на нові вітчизняні або зарубіжні, їх приводів авіаційного та суднового типу з прийнятними екологічними характеристиками;
- удосконалення технологічного обладнання для забезпечення його герметичності та надійності;
- оптимізація режимних параметрів експлуатації ГТУ;
- переведення окремих цехів (або КС вцілому) на електропривід;
- збільшення висоти димовідвідних шахт;
- розміщення цехів КС на окремих площах на відстані мінімального взаємного екологічного впливу (на стадії будівництва та реконструкції КС);
- розроблення та впровадження каталітичних методів очищення продуктів згорання та каталітичних камер згорання;
- зміна навантаження ГПА шляхом регулювання робочого процесу у камері згорання;
- використання вторинних енергетичних ресурсів при впровадженні енергозберігального обладнання та систем, що істотно економлять паливо та зменшують кількість шкідливих речовин, які викидаються у навколишнє середовище.

Найбільш аварійно небезпечними об'єктами КС є підземні трубопроводи, у зв'язку з чим необхідно забезпечити відповідний рівень експлуатації та діагностики труб для виявлення дефектів й усунення їх на ранніх етапах утворення.

1.5 Мета і постановка завдань дослідження

Аналіз результатів вітчизняних та закордонних досліджень, пов'язаних з розв'язанням теоретичних і прикладних задач із узагальненням впливу роботи КС магістральних газопроводів на екологічний стан території показав, що основним джерелом забруднення, яке утворює шкідливі речовини: оксиди азоту, оксиди вуглецю та інші, є камера згорання газоперекачувального

агрегату. Механізм, хімічні реакції, які проходять під час згорання паливного газу в камерах згорання газоперекачувальних агрегатів, ще недостатньо вивчені, а математичні моделі згорання газу потребують уточнення і розвитку. Узагальнення залежностей, пов'язаних з описом впливу техніко-технологічних режимів роботи газоперекачувальних агрегатів на концентрацію викидів в атмосферу шкідливих газів, що утворюються під час згорання, зумовлене необхідністю отримання багатofакторних залежностей для прогнозування забруднення територій КС шкідливими речовинами.

Потребують розвитку закономірності розповсюдження шкідливих викидів в атмосфері та їх осідання на території КС і за її межами. При цьому важливо врахувати властивості середовища, швидкостей викидів у вертикальному і швидкостей вітру в горизонтальному напрямках. Важливим є уточнення залежностей для прогнозування дальності розповсюдження шкідливих викидів, що може бути використано для кількісної оцінки і розповсюдження кожної речовини викидів по радіусу від джерела їх утворення і зіставлення з нормативними показниками.

Для покращення екологічної ситуації на території КС необхідно удосконалити пристрої, якими можна контролювати наявність в атмосферному повітрі твердих частинок – продуктів неповного згорання газу. Таке всеохоплювальне спостереження за розповсюдженням викидів шкідливих речовин допоможе розробити уточнені заходи по зменшенню викидів.

Важливим, з практичної точки зору, є розроблення нових техніко-технологічних способів зменшення шкідливих викидів шляхом регулювання режимів роботи газоперекачувальних агрегатів, які забезпечували б еколого-безпечну роботу КС.

Заслужуює на увагу створення нових способів і пристроїв для зменшення шкідливих викидних газів та зменшення їх токсичності.

На сьогодні існує багато науково-прикладних розробок, пов'язаних зі зменшенням викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря, проте в

багатьох випадках їх складно реалізувати на практиці через технологічну складність.

Враховуючи викладене нами, сформовані мета досліджень даної роботи, основні завдання, визначений об'єкт та предмет досліджень, зазначені вище.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗГОРАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В КАМЕРІ ЗГОРАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ

Компресорні станції як об'єкти газового комплексу істотно впливають на навколишнє середовище. Екологічний вплив на повітряний басейн проявляється в вигляді легких викидів, що охоплюють об'єкти транспортування, газоподібних речовин оксиду та діоксиду вуглецю, метану, оксидів азоту, неметалевих легких органічних сполук [99].

Незважаючи на значні переваги трубопровідного транспорту серед інших видів транспортування, уникнути забруднення атмосфери неможливо. На навколишнє середовище суттєво впливають такі об'єкти газотранспортної системи, як компресорні станції, газопроводи, установки комплексної підготовки газу та підземні сховища [100-104].

Під час роботи газоперекачувальних агрегатів, через спалювання природного газу, в повітря викидається велика кількість забруднювальних речовин [7, 33, 59, 105-109]. Для управління цим процесом необхідне вивчення процесів, що проходять у камерах згорання газоперекачувальних агрегатів.

Нижче подано розроблену математичну модель роботи камери згорання, яка враховує основні техніко-технологічні параметри газотурбінного перекачувального агрегату.

2.1 Аналіз складу та динаміки викидів шкідливих речовин під час роботи КС

Утворення викидів шкідливих речовин КС відбувається внаслідок функціонування основного виробництва, допоміжного виробництва, а також інших господарських об'єктів КС невиробничого характеру.

Основне виробництво передбачає перекачування газу ГПА. За типом нагнітачів ГПА поділяють на поршневі газомоторні компресори та ГПА з відцентровими нагнітачами [110]. З точки зору екологічної безпеки більш актуальною є класифікація ГПА за типом приводу, оскільки саме цей фактор є визначальним для оцінювання ступеня впливу на довкілля:

- ГПА з газовим двигуном внутрішнього згорання;
- ГПА з газотурбінним приводом;
- ГПА з електроприводом.

Під час проектування КС той чи інший ГПА вибирають та застосовують, в основному, за такими технологічними параметрами:

- об'ємом газу, який перекачуватиме КС;
- тиском та температурою газу на вході і виході;
- хімічним складом та вологістю перекачуваного газу;
- фізико-географічними умовами розташування КС;
- кількістю годин напрацювання КС;
- класом виконання (сейсмостійкість, вибухозахист тощо);
- допустимим вмістом масла в газі на виході;
- типом автоматики.

Фактор екологічної безпеки під час проектування КС був другорядним і практично не врахованим. При цьому з точки зору ступеня впливу на довкілля нафтогазового комплексу КС посідають провідне місце, зокрема в частині впливу на атмосферне повітря [111]. В умовах України найбільш використовують ГПА з газовим двигуном внутрішнього згорання та ГПА з газотурбінним приводом. Формування складу викидів забруднювальних речовин ГПА відбувається через продукти згорання природного газу: оксидів азоту NO_x , оксиду вуглецю CO , діоксиду вуглецю CO_2 , водяної пари H_2O та інших продуктів окислення домішок, що можуть міститися в газі.

Викиди забруднювальних речовин від роботи ГПА належать до «планових технологічних», оскільки їх утворення проходить постійно в процесі експлуатації ГПА.

Іншим джерелом викидів забруднювальних речовин основного виробництва КС є транспортні мережі. За умови нормальної експлуатації КС викидів забруднювальних речовин від транспортних мереж практично немає. Вони можуть виникати лише внаслідок виникнення різного роду аварійних ситуацій та за необхідності спорожнення системи для проведення ремонтів, профілактики тощо. При цьому викиди забруднювальних речовин відбуваються шляхом стравлення газу через свічки, запобіжні клапани, спалювання на факелі або, неконтрольовано, внаслідок розгерметизації системи. При цьому в атмосферу, потрапляють компоненти, що входять до складу природного газу: метан CH_4 , етан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10} , пентан C_5H_{12} , гексан C_6H_{14} , або продукти згорання газу: оксиди азоту NO_x , оксид вуглецю CO , діоксид вуглецю CO_2 , водяна пара H_2O . Викиди забруднювальних речовин від транспортних мереж мають «залповий» характер [112].

Допоміжне виробництво КС, в основному, представлене транспортними підрозділами, зварювальними постами, цехами допоміжного виробництва (ремонтні, столярні, слюсарні тощо), котельнями, дизельгенераторами на випадок аварійного вимкнення електроенергії, будівельними підрозділами, лабораторіями та ін.

Господарські об'єкти КС невиробничого характеру можуть включати побутові приміщення, підсобні господарства, їдальні тощо.

Перелік забруднювальних речовин від допоміжного виробництва та інших господарських об'єктів КС може відрізнятись залежно від наявності тих чи інших підрозділів у складі КС.

У табл. 2.1 наведено гранично допустимі (ГДК) і фактичні концентрації викидів забруднювальних речовин КС Богородчанського ЛВУМГ протягом 2014 року.

Таблиця 2.1

**Величини масового викиду шкідливих речовин в атмосферу
технологічним обладнанням компресорних станцій Богородчанського
ЛВУМГ**

Назва забруднювальної речовини	ГДК, мг/м ³	Фактична величина викиду, т/рік
КС "Союз"		
Гідроксид натрію	0,5	0,00001
Оксиди азоту (NO+NO ₂)	0,2	1239,15
Хлористий водень	0,15	0,000011
Сірчана кислота	5	0,00005
Оксид вуглецю	20	197,103
Фториди	0,5	0,00019
Метан	0,2	1044,381
Діоксид вуглецю	10	377657,9
Оксид азоту(1)	0,2	15,7
КС-39 газопровід УПУ		
Оксиди азоту (NO+NO ₂)	0,2	924,7
Оксид вуглецю	20	230,02
Метан	0,2	16424,74
Діоксид вуглецю	10	338492,39
Оксид азоту(1)	0,2	14,2

Незважаючи на те, що в процесі спалювання вуглеводнів утворюється значна кількість діоксиду вуглецю, останній не є токсичною речовиною, оскільки не має безпосереднього шкідливого впливу на довкілля, тому в сучасній екології як забруднювальну речовину його не розглядають [113].

На рис. 2.1 показано розподіл утворення шкідливих речовин на КС (на прикладі Богородчанського ЛВУМГ).

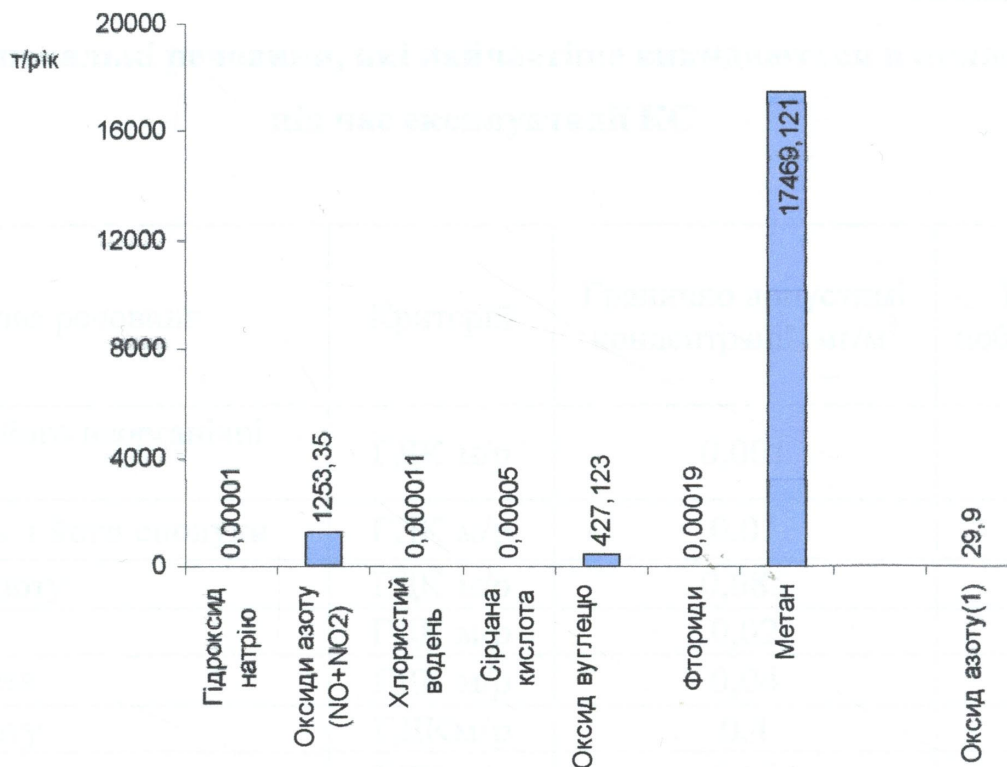


Рис. 2.1 Розподіл утворення шкідливих речовин на прикладі КС Богородчанського ЛВУМГ

Основна частина викидів припадає на метан, на другому місці за кількістю викидів – оксиди азоту, на третьому – оксид вуглецю. Викиди забруднювальних речовин від допоміжного господарства та інших об'єктів КС становлять зовсім незначну частку і тому в дисертаційній роботі їх не розглянуто.

Для об'єктивного визначення речовин, що мають найбільший вплив на довкілля, ще слід враховувати: ступінь токсичності речовин, викидуваних у довкілля; можливість утворення забруднювальних речовин з точки зору технології виробництва.

Ступінь токсичності речовини визначається її гранично допустимою концентрацією та класом небезпеки [114]. Гранично допустимі концентрації та класи небезпеки забруднювальних речовин, що утворюються під час роботи КС, наведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2

**Забруднювальні речовини, які найчастіше викидаються в атмосферу
під час експлуатації КС**

Назва речовини	Критерій	Гранично допустимі концентрації, мг/м ³	Клас небезпеки
Свинець і його неорганічні сполуки	ГДК м/р	0,001	1
Марганець і його сполуки	ГДК м/р	0,01	2
Діоксид азоту	ГДК м/р	0,085	2
Фториди	ГДК м/р	0,02	2
Оксид заліза	ГДК м/р	0,04	3
Оксид азоту	ГДК м/р	0,4	3
Сажа	ГДК м/р	0,15	3
Сірки діоксид	ГДК м/р	0,5	3
Спирт метиловий	ГДК м/р	1,0	3
Вуглецю оксид	ГДК м/р	5,0	4
Бензин нафтовий	ГДК м/р	5,0	4
Кремнію діоксид	ОБРВ	0,02	
Метан	ОБРВ	50,0	
Одорант- СПМ	ОБРВ	0,00005	
Пил абразивний	ОБРВ	0,04	
Пил дерев'яний	ОБРВ	0,1	

З табл. 2.2 видно, що ГДК забруднювальних речовин для метану становить 50,0 мг/м³, оксиду азоту – 0,4 мг/м³, діоксиду азоту – 0,085 мг/м³, оксиду вуглецю – 5,0 мг/м³. Отже, найбільш токсичними речовинами, з точки зору екологічної безпеки є діоксид азоту, оксид азоту, оксид вуглецю, а найменш токсичним – метан.

Крім того, слід відзначити, що розглядати процес утворення «залпових» (аварійних) викидів, як об'єкт наукових досліджень у нашому випадку недоцільно, оскільки виникнення аварійних ситуацій спричиняє вплив тих чи

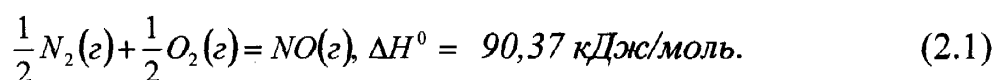
інших суб'єктивних чинників, які не пов'язані з технологічним процесом, несправностями, руйнуванням запчастин.

Отже, найбільш актуальним з точки зору екологічної безпеки є вивчення процесів згорання газу та прогнозування утворення оксиду вуглецю і оксидів азоту.

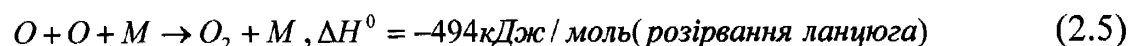
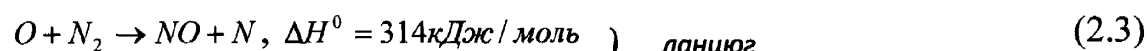
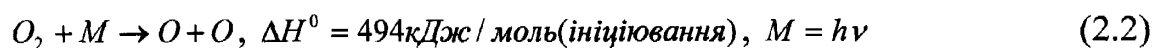
2.2 Дослідження процесу утворення оксидів азоту в процесі експлуатації газоперекачувального агрегату

2.2.1. Теоретичні аспекти утворення оксидів азоту в процесі експлуатації ГПА. Утворення оксидів азоту при спалюванні газів відбувається, в основному, в результаті окислення азоту повітря за високих температур. Цей процес характеризується складною хімічною кінетикою та розроблений ще в недостатній мірі, для того щоб прогнозувати концентрації та об'єми оксидів азоту в продуктах згорання на основі теоретичних розроблень [115].

Вивченням умов утворення оксидів азоту займалися багато дослідників (Бурико Ю. Я. [17], Гомонай В. І. [116], Зимон А. Д. [117], Середа І. П. [118] та ін.), які встановили, що формальна кінетика реакцій окислення атмосферного азоту вільним киснем досить добре описується рівнянням:



Зельдович Я. Б. [119] розробив ланцюгову схему окиснення нітрогену, в якій активну роль відіграють вільні атоми азоту та вуглецю:



Згідно з цією схемою вихід NO визначається реакцією між атомом кисню та молекулою азоту. При цьому кількість атомарного кисню визначається дисоціацією молекули O_2 . Ці процеси мають дуже високий енергетичний бар'єр $E^* = 561$ кДж / моль і, відповідно, визначаються температурою процесу.

Дослідники також розглянули швидкість зворотної реакції-розкладу оксиду азоту та одержали рівняння для рівної кількості газу NO:

$$[C_{NO}] = 4,6 \sqrt{C_{O_2} C_{N_2} \exp(-21500/(RT))}, \quad (2.6)$$

де $[C_{NO}]$, C_{O_2} , C_{N_2} – концентрації NO, O_2 , N_2 в зоні горіння [mg/m^3], T – температура горіння, R – універсальна газова стала.

З аналізу досліджень випливає, що концентрації оксиду азоту експоненціально залежать від температури горіння. Так, за температури 800 °К масові частки концентрації, $C_{NO} = 0,00254$ г/м³, за температури 1800 °К, $C_{NO} = 4,7$ г/м³, а за температури 2500 °К вона досягає вже значення $31,7$ г/м³.

Концентрації C_{O_2} і C_{N_2} в зоні горіння визначається коефіцієнтом α надлишку повітря [72,115].

$$C_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)L_0 / (1 + \alpha L_0), \quad (2.7)$$

$$C_{N_2} = 0,78(\alpha - 1)L_0 / (1 + \alpha L_0), \quad (2.8)$$

де L_0 – теоретично необхідна кількість повітря.

Як бачимо, що зі збільшенням α величини C_{O_2} та C_{N_2} зростають, і тому зі збільшенням α зростає й концентрація оксиду нітрогену C_{NO} в зоні горіння. Проте, ця залежність не має експоненціального характеру і зі зростанням α темпи зростання концентрації C_{NO} зменшуються.

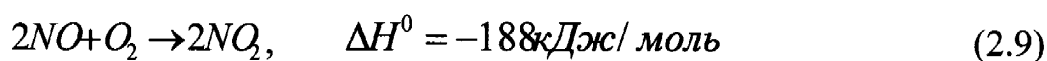
Описаний механізм утворення оксидів азоту хоч і носить спрощений характер, проте межі його використання ще не встановлені.

Низка авторів [115, 120] розглянули інші моделі процесу горіння природних газів і утворення оксидів азоту та вуглецю. Вони враховують велику кількість компонентів, які беруть участь в елементарних реакціях. Ці моделі, звичайно, дозволяють дати більш детальну картину процесу горіння з описом нерівномірності розподілення температур і концентрацій компонентів у різних частинах полум'я. Однак, щодо концентрації оксиду азоту, то вони лише підтверджують експоненційну залежність від температури горіння і степеневу залежність від надлишку повітря в зоні горіння.

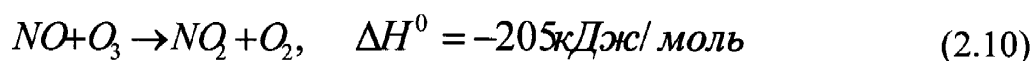
Дослідники [73, 103, 121] показують, що при спалюванні раніше підготовлених «збіднених» сумішей, виміряних у дослідженні, концентрації NO_x в 2-5 разів перевищують розрахунки по рівноваговим моделям. Проте моделі, які пояснюють це явище, ще не побудовано, і для розрахунку концентрації NO_x слугує півімперична методика, яка заснована на обліку температури горіння, надлишку повітря та швидкості окислення палива.

Слід відмітити, що після виходу оксиду азоту з димової труби в атмосферу, основна частина оксиду азоту переходить ще в більш токсичний діоксид азоту за двома основними реакціями:

а) за високих концентрацій у корінні факелу внаслідок окислення киснем у результаті екзотермічних реакцій:



б) за низьких концентрацій у результаті окислення атмосферним озоном:



Остання реакція за низьких концентрацій проходить у 10^5 разів швидше від реакції (2.9) і є переважальною.

Отже, після виходу димових газів в атмосферу не тільки збільшується їхня токсичність внаслідок збільшення частки газу NO_2 , але й активно знижується концентрація атмосферного озону.

2.2.2 Методика досліджень оксидів азоту у викидах ГПА.

Концентрації оксидів азоту визначається фотоколориметричним методом з використанням методу Гріса-Ілосвая [122]. Методика призначена для визначення концентрації суми оксиду та діоксиду азоту у викидах, діапазон вимірювання концентрацій від 10-1000 мг/м³. Похибка вимірювання – 13 % від значення, яке визначають.

Метод вимірювання. Метод базується на взаємодії нітрит-іону і п-амінобензолсульфо кислоти (сульфанілова кислота) з утворенням діазоз'єднання, яке, реагуючи з 1-нафтиламіном, дає азобарвник, що забарвлює розчин від блідо-рожевого до червоно-фіолетового кольору. Інтенсивність забарвлення пропорційна до концентрації нітритів.

Оптичну щільність розчину вимірюють за допомогою фотоелектроколориметра.

Вплив діоксиду сірки усувається кристалічним оксидом хрому (VI), трубка з яким розміщується при відборі газу перед газовою піпеткою, та додаванням до поглинаючого розчину 10 % ацетону.

Під час виконання вимірювань використано матеріали:

- фотоелектроколориметр, ГОСТ 1208–78;
- ваги аналітичні, ГОСТ 24104–80 Е;
- міри ваги, ГОСТ 7328–82 Е;
- термометр зі шкалою ділення 0,1° С, ГОСТ 215–73 Е;
- барометр, ГОСТ 23696–79 Е;
- вакуумометр типу ВТИ, ТУ 25.05.1481–73;
- газовідбірна трубка;
- фільтрувальний патрон;
- насос із всмоктувальним та нагнітальним штуцерами;
- насос вакуумний 2НВР-5ДМ, ТУ 26-04-604–79;
- газові піпетки, ємністю 200 мл;
- апарат для струшування колб та пробірок АВУ-10р, модель Ц-2332,

ТУ 64–1–1081–73;

- колби мірні 1-50-2, 1-100-2, 1-250-2, 1-500-2, ГОСТ 1770–74 Е;
- піпетки 1-2-1, ГОСТ 20292–74;
- циліндри 1-250, 1-500, ГОСТ 1770-74Е;
- бюретки 6-2-10-0,05, 5-2-100-0,1, ГОСТ 20292–74 Е;
- оцтова кислота, ГОСТ 61–75;
- 1-нафтиламін, ГОСТ 7727–74;
- п-амінобензолсульфо кислота, ГОСТ 5821–78;
- нітрит натрію, ГОСТ 4197–74;
- оксид хрому (VI), ГОСТ 3776–78;
- ацетон, ГОСТ 2603– 79;
- вода дистильована, ГОСТ 6709–72;
- фільтр паперовий, ТУ 6-09-1678–77.

Приготування розчинів. Для приготування 12 % розчину оцтової кислоти 128 мл концентрованої оцтової кислоти (99,5 %) поміщають у мірну колбу ємністю 1000 мл та доводять водою до мітки.

Для отримання розчину п-амінобензолсульфо кислоти (сульфанілової кислоти) 1,5 г її розчиняють у 450 мл 12 %-го розчину оцтової кислоти. Розчин готують не менше ніж за добу до використання і зберігають у щільно закритій склянці з темного скла.

Розчин 1-нафтиламіну готують шляхом розчинення 0,3 г його в 60 мг води. Нагрівають на водяній бані до утворення на дні колби бузкових крапель, фільтрують через паперовий фільтр, залишаючи осад на дні колби. До фільтрату доливають 440 мг 12 %-го розчину оцтової кислоти. Розчин готують не менше ніж за добу до використання.

Поглиняльний розчин готують безпосередньо перед використанням шляхом змішування розчину 1-нафтиламіну і п-амінобензолсульфо кислоти в співвідношенні 1:1 і додають 10 % ацетону до загального об'єму.

Для приготування вихідного стандартного розчину 2-3 грами нітрату натрію розтирають і сушать при 50-60 °С протягом 2 год. Висушений нітрит

натрію (0,1497 г) розчиняють у мірній колбі ємністю 100 мл водою. Цей розчин відповідає вмісту діоксиду азоту 1 мг/мл.

Робочий стандартний розчин готують перед аналізом, для чого в мірну колбу ємністю 250 мг піпеткою Мора вносять 1 мг вихідного стандартного розчину ємністю 1 мг і доводять до мітки водою; 1 мг робочого стандартного розчину містить 0,004 мг нітрит-іона.

Робочий стандартний розчин Б готують перед аналізом. У мірну колбу ємністю 100 мг піпеткою Мора вносять 1 мг вихідного стандартного розчину ємністю 1 мг і доводять до мітки водою; 1 мг робочого стандартного розчину містить 0,01 мг нітрит-іона.

Для перетворення оксиду азоту в діоксид як окислювач використовують оксид хрому (VI), який поміщають у скляну трубку діаметром 6 мм. Довжина шару складає 17 см.

Побудова градуювальних залежностей. Будують дві залежності оптичної густини від концентрації діоксиду азоту по 3-5 серіях градуювальних розчинів. Першу залежність будують для визначення малої кількості нітрит-іонів у 50 мл розчину (0,004-0,028 мг), другу – для великого (0,01-0,06 мг).

У мірні колби ємністю 50 мл за допомогою мікробюретки ємністю 10 мл вносять робочий стандартний розчин нітрату натрію, доводять об'єм до мітки поглинальним розчином, який містить 10 % ацетону (за об'ємом), інтенсивно струшують і через 20 хв. вимірюють оптичну густину розчинів на фотоелектроколориметрі при довжині хвилі 540 нм відносно поглинального розчину, який служить розчином для порівняння.

Відбір проб. Збирають установку для відбору газів. Вставляють газовідбірну трубку в газохід і продувають для прогрівання системи газів, які аналізуємо, за допомогою аспіратора чи насоса протягом 3-5 хв. Від'єднують насос і приєднують вакуумну посудину з поглинальним розчином. Встановлюють кран у положення «вакуумметр – посудина», відкривають кран на вакуумній посудині і вимірюють розрідження в ньому. Потім кран

встановлюють у положення «газовідбірна трубка – вакуумметр – посудина» і проводять відбір газу.

Час, протягом якого проводять відбір газу, має складати 20 хв. Кількість відібраних для аналізу проб має бути не менше ніж три.

Аналіз проб. Відібрані для аналізу проби зберігаються не більше доби. Визначають оптичну густину розчину на фотоколориметрі за довжини хвилі 540 нм в кюветах з відстанню між гранями 5 або 10 мм залежно від концентрації оксидів азоту. За оптичною густиною розчину і градуовальною залежністю знаходять вміст нітрит-іона в пробі, яку аналізуємо.

При аналізі газової проби вимірюють залишковий тиск за допомогою вакуумметра.

Опрацювання результатів аналізу. Об'єм газової суміші (V_z), яка відібрана для аналізу, розраховують таким чином:

$$V_z = V_n - V_{жс}, \quad (2.11)$$

де V_n – ємність газової піпетки, мл; $V_{жс}$ – об'єм поглинального розчину в піпетці, мл.

Об'єм газу за нормальних умов (V_o) розраховують за формулою:

$$V_o = \frac{273V_z(P - P' - P'')}{101,3(273 + t)}, \quad (2.12)$$

де V_z – об'єм відібраного для аналізу газу, мл; P – атмосферний тиск, Па; P' – залишковий тиск газу в вакуумній посудині, Па; P'' – залишковий тиск у вакуумній посудині після відбору проби газу з газоходу, Па; t – температура навколишнього повітря, $^{\circ}\text{C}$.

Концентрацію діоксиду азоту (C_{NO_2} , мг/м^3) розраховують за формулою:

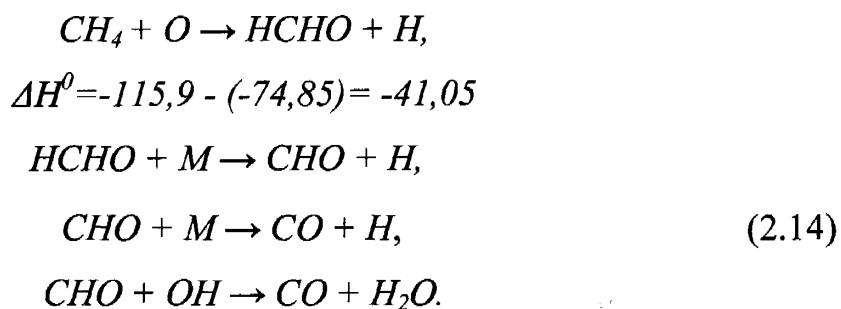
$$C_{NO_2} = \frac{2aV_n}{V_oV_k} \cdot 10^6, \quad (2.13)$$

де a – кількість нітрит-іону, знайдена за градуовальною залежністю, мг; 2 – коефіцієнт, який враховує утворення однієї молекули азотної кислоти з двох молекул діоксиду азоту; V_n – об'єм поглинального розчину, залитий у газові піпетки, мг; V_k – об'єм поглинального розчину, для якого побудовано градуовальний графік, мг ($V_k=50$ мг); V_o – об'єм газової проби, приведений до нормальних умов, мг.

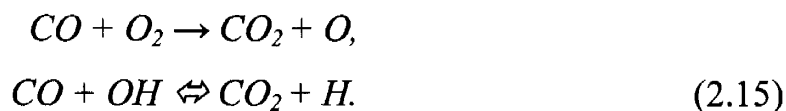
За знайденими значеннями концентрації оксидів азоту в пробах розраховують середнє арифметичне значення.

2.3 Утворення оксидів вуглецю в процесі експлуатації ГПА

Утворення оксиду вуглецю при горінні природних газів проходить у результаті таких швидких реакцій [72].



Поряд з цими реакціями йдуть реакції згорання CO :



Перша з цих реакцій є повільною і не відіграє значної ролі в вигоранні оксиду вуглецю.

Згідно з розрахунками масових часток стану всіх компонентів реакції горіння, проведеними в роботі [115], концентрація C_{CO} зростає зі збільшенням температури горіння і знижується зі збільшенням надлишку повітря.

Концентрації оксиду вуглецю визначають методом, що базується на відділенні метану і оксиду вуглецю від повітря на колонці з цеолітами, конверсії оксиду вуглецю до метану на нікелевому каталізаторові і детектуванні полум'яно-іонізаційним детектором. Інші сполуки, наявні у пробі, визначенню не заважають.

Засоби вимірювання, реактиви, матеріали:

- хроматограф з полум'яно-іонізаційним детектором;
- секундомір, ГОСТ 5072–79Е;
- пічка муфельна ($t_{\text{макс}}=1000$ °С);
- аспіратор Коро, ГОСТ 18954–73;
- аспіраційний пристрій М-822;
- реактор;
- набір сит «Фізприлад» або сита аналогічного типу;
- ексикатор, ГОСТ 23932–79Е;
- піпетки газові, ємністю 250-500 см³, ГОСТ 1770–74;
- шприци цільноскляні, ємністю 100 см³, ТУ 64-1-1279–75;
- посуд лабораторний фарфоровий, ГОСТ 9147–73;
- скляний фільтрувальний патрон, розміром 0,2*4 м;
- сітка дротяна або скловолокно;
- цеоліти типу СаА;
- ніхромовий дріт марки Х20Н80 перерізом 0,15-0,25 м, ГОСТ 12766–67;
- аскарит, ТУ 6-09-3880–79;
- натрій хлористий, ГОСТ 4233–77;
- вода дистильована, ГОСТ 6709–72;
- водень технічний, ГОСТ 3022–80;
- повітря, ГОСТ 11882–73;
- атестовані градуйовані суміші оксиду вуглецю та метану з повітрям або азотом, по ТУ 6-21-31–78 та ТУ 6-31-28, з вмістом оксиду вуглецю від 4 до 600 мг/м³, метану від 6 до 600 мг/м³.

Відбирання проб. Проби відбирають аспіратором КОРО за допомогою пристрою з інертного матеріалу (скло, фарфор, нержавіюча сталь). Допускається відбирати проби в гумові камери.

Приготування каталізатора. Ніхромовий дріт діаметром 0,15-0,25 мм нарізують на куски 1-3 мм, прожарюють у муфельній печі за температури 1000 °С протягом 2 год, після чого засипають у реактор з нержавіючої сталі, кінці якого закривають пробками зі скловолосна. Реактор монтують у випаровувач, збирають газову схему, встановлюють параметри, згідно з умовами аналізу, та проводять процес відновлення каталізатора протягом 5-6 год у точці газоносія водню.

Приготування сорбенту. Цеоліти подрібнюють, відсіюють фракцію 0,25-0,50 мм, прожарюють у муфельній печі при 350 °С протягом 3-4 год, потім охолоджують в ексікаторі.

Приготування хроматографічної колонки. Колонки підготовлюють і заповнюють сорбентом згідно з інструкцією з монтування та експлуатації хроматографа. Внаслідок гігроскопічності цеолітів колонку слід заповнювати швидко.

Хроматограф підключають до мережі, перевіряють на герметичність і виводять на режим згідно з інструкцією з монтування та експлуатації хроматографа.

Колонку, заповнену сорбентом, встановлюють у термостат хроматографа і активують у струмі газоносія при 80 °С протягом 3 год, підвищуючи температуру до 300 °С протягом 1 год і витримують за цієї температури 3-4 год.

Аналіз проб. Проби газу після відбору витримують при кімнатній температурі не менше ніж 30 хв. Проби вводять у хроматограф краном-дозатором через скляний патрон з аскаритом. Якщо проби відбирають в газові піпетки, то газ витисняють насиченим розчином хлористого натрію.

Умови проведення аналізу:

Довжина колонки 3 м, діаметр 3 мм;

Сорбент-цеоліти СаА, фракція 025-0,50 мм;

Реактор: довжина 0,3 м, діаметр 3 мм;

Каталізатор для конверсії оксиду вуглецю – ніхромовий дріт марки Х20Н80;

Наповнювач фільтрувального патрона – аскарит;

Температура термостата 80 °С;

Температура реактора (випаровувача) 325 °С;

Витрати газоносія (водню) 40 см³/хв;

Витрати повітря 300 см³/хв;

Об'єм проби 2 см³;

Швидкість ленти потенціометра 240 мм/год;

Градування хроматографа. Кількісний розрахунок виконують методом абсолютного градування. Для знаходження градувальних коефіцієнтів необхідно хроматогрувати 5 градувальних сумішей з різними концентраціями метану і оксиду вуглецю, які рівномірно розподілені по діапазону вимірювання. Градувальну суміш не менше ніж 5 разів подають у хроматографічну колонку і на отриманих хроматограмах визначають значення висот піків. Дану процедуру повторюють для всіх узятих сумішей.

Наведене значення висоти h_{npi} визначають за формулою:

$$h_{npi} = \bar{h}_i M, \quad (2.16)$$

де \bar{h} – середнє значення висоти піку, мм; M – масштаб послаблення вихідного сигналу.

Використовуючи отримані дані, визначають градувальний коефіцієнт b за формулою:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^k C_i h_{npi}}{\sum_{i=1}^k h_{npi}^2}. \quad (2.17)$$

Для перевірки правильності виконання вимірювань щоденно на вході приладу подають градувальну суміш однієї визначеної концентрації C вхідного компоненту і визначають висоту піку.

Отримане значення h_t порівнюють з початковим значенням h_{zp} , яке відповідає концентрації на градуювальній характеристиці хроматографа, і складають відношення:

$$A = \frac{|h_t - h_{zp}|}{h_{zp}} \quad (2.18)$$

Якщо отримане значення A не перевищує значення $1,8 \delta_{zp}$, то результати проведених вимірювань вважають дійсними.

Опрацювання результатів вимірювання. Концентрацію оксиду вуглецю і метану (C_i , мг/м³) визначають за формулою:

$$C_i = ah_{zpi} \quad (2.19)$$

а відносну похибку градуювання δ_{zp} – за формулою:

$$\delta_{zp} = 2\sqrt{\frac{S^2 a}{a^2} + \frac{\delta_{ac}^2}{3}}, \quad (2.20)$$

де $S^2 a$ – дисперсія оцінки градуювального коефіцієнта; a – градуювальний коефіцієнт; δ_{ac} – похибка атестації градуювальних сумішей.

Для оксиду вуглецю δ_{zp} складає 7 %, для метану – 12 % при використанні градуювальних сумішей з $\delta_{ac} = 5$ і $\delta_{ac} = 10$ % відповідно.

Нестабільність градуювальної характеристики δ_t визначають за формулою:

$$\delta_t = \frac{\bar{h}_t - \bar{h}}{\bar{h}}, \quad (2.21)$$

де \bar{h} – середнє значення висоти піку з 10 вимірів однієї концентрації; \bar{h}_t – середнє значення висоти піку з 10 вимірів однієї концентрації через час $t = 24$ год.

Для даної методики δ , складає не більше ніж 3 %.

Сумарна відносна похибка хроматографічного аналізу в діапазоні концентрацій 0,2-20,0 мг/м³ для оксиду вуглецю не більше ніж 20 %, для метану не більше ніж 25 %; в діапазоні концентрацій 20-600 мг/м³ для оксиду вуглецю не більше ніж 15 %, для метану – не більше ніж 20 %.

2.4 Дослідження концентрацій викидних газів з використанням газоаналізатора Testo-350

Зазначені методики лабораторних досліджень для визначення якісного і кількісного складу викидів продуктів згорання природного газу під час роботи газотурбінних двигунів газоперекачувальних агрегатів складні у виконанні, оскільки потребують великої кількості додаткового обладнання, дефіцитних реагентів, значних втрат часу для відбирання проб і їхнього збереження, визначення компонентів їх складу, відповідної кваліфікації персоналу. У той самий час, як наведено вище, сумарна похибка хроматографічного аналізу викидних газів складає в середньому, наприклад, для оксиду вуглецю до 20 %.

Для дослідження складу викидних газів також можна використати газоаналізатор Testo-350 [123], який має сенсори для одночасного вимірювання в викидах концентрації оксиду азоту NO, діоксиду азоту NO₂, оксиду вуглецю CO, а також інших газів. Газоаналізатор Testo-350 сертифікований Держстандартом України та внесений до держреєстру приладів України [124] (дозвіл використання в Україні У645-12).

Газоаналізатор Testo-350 складається з промислового зонда, блока підготовки проби для тестування, блока аналізування та командно-вимірювального блока.

Розширення застосування газоаналізатора типу Testo-350 привело до розробки великої кількості зондів, які відрізняються довжиною, температурними режимами роботи.

Місце забору проб викидного газу газотурбінної установки регламентовано нормативними документами. Газовідбірний зонд з'єднується з блоком пробопідготування шлангом, що підігрівається, обладнаний автоматичним регулюванням температури і фільтром для очищення газової проби від пилу. Шланг дозволяє зберігати температуру газів на рівні $+150^{\circ}\text{C}$, щоб волога, яка міститься в газі не конденсувалася в фільтрі. Завдяки цьому досягається точність вимірювання оксидів азоту та оксидів вуглецю, яка не складає $\pm 5\%$ від вимірювальної величини.

Блок пробопідготування міститься між газовідбірним зондом та газоаналізатором. Підігріта, очищена та осушена проба потрапляє в блок-аналізатор. Блок пробопідготування працює автоматично. Для підготовки його до експлуатації необхідно проводити додаткове налагодження. На панелі керування встановлені індикатори для діагностування робочого стану приладу.

Виявляючи несправність, блок пробопідготування сповіщає про це і електроніка автоматично відмикає прилад. Електроніка контролює обігрівання шланга, роботу холодильника, його готовність до експлуатації та температуру навколишнього середовища.

Блок аналізатора забезпечує захист сенсорів, насосів і вмонтованих електронних схем. У блоці аналізатора є сенсори газу, насоси для продування, блок пробопідготування, фільтри, електронні схеми, які відповідають за аналіз та зберігання даних, а також блок живлення і літєво-іонний акумулятор. Управління відбувається за допомогою прямого підключення до ноутбука. Блок аналізатора може самостійно виконувати заміри та зберігати отримані дані. Штекерні роз'єми для підключення зондів та кабелів, шини фіксуються за допомогою штифтів, що забезпечує надійність підключення до блока аналізатора та дозволяє попередити випадкові від'єднання, уникнути помилки під час вимірювань.

Прилад має вмонтовану пам'ять, USB-інтерфейс, дооснащений до 6 сенсорів газу. Крім цього, можливий розрахунок таких параметрів:

концентрації вуглекислого газу CO_2 , коефіцієнта втрат тепла з димовими газами та ін.

Для зменшення похибки під час вимірювання концентрації речовин у викидних газах ГПУ блок-аналізатор розміщують дуже близько до місця відбору газової проби. У блоці-аналізаторі встановлені комірки, які за електрохімічним принципом визначають концентрацію компонентів (NO , NO_2 , CO , O_2 , SO_2) у викидному газі. Комірки перетворюють вміст газу в електросигнали, які через кабель передаються до командно-вимірювального блока.

Всі процеси вимірювання від газовідбірної зонди до блока-аналізатора контролює ручний командно-вимірювальний блок. Він виводить на дисплей всі параметри аналізу, а його електроніка контролює стан всієї вимірювальної системи.

Використання газоаналізаторів Testo-350 дозволяє значно скоротити час аналізу та обробки результатів досліджень.

2.5 Математична модель процесів горіння газу в камері згорання

Проблема зниження токсичності продуктів згорання газоперекачувальних агрегатів (ГПА), що перебувають в експлуатації на компресорних станціях магістральних газопроводів, є складовою програми науково-технічного прогресу в газовій промисловості [125]. Для їх впровадження необхідно підвищувати ефективність роботи низькоемісійних камер згорання.

На основі аналізу сучасних способів організації робочого процесу і тенденцій покращення ефективності роботи паливоспалювальних пристроїв вже сформульовані основні вимоги, яким повинні відповідати низькоемісійні камери згорання [69, 74, 126-129].

Газотурбінна установка (ГТУ) на компресорних станціях служить двигуном для приводу відцентрових нагнітачів (ВН) газу і відноситься до

паливоспалювальних пристроїв великої одиничної потужності. Принципову схему газового тракту ГТУ [110] подано на рис. 2.2.

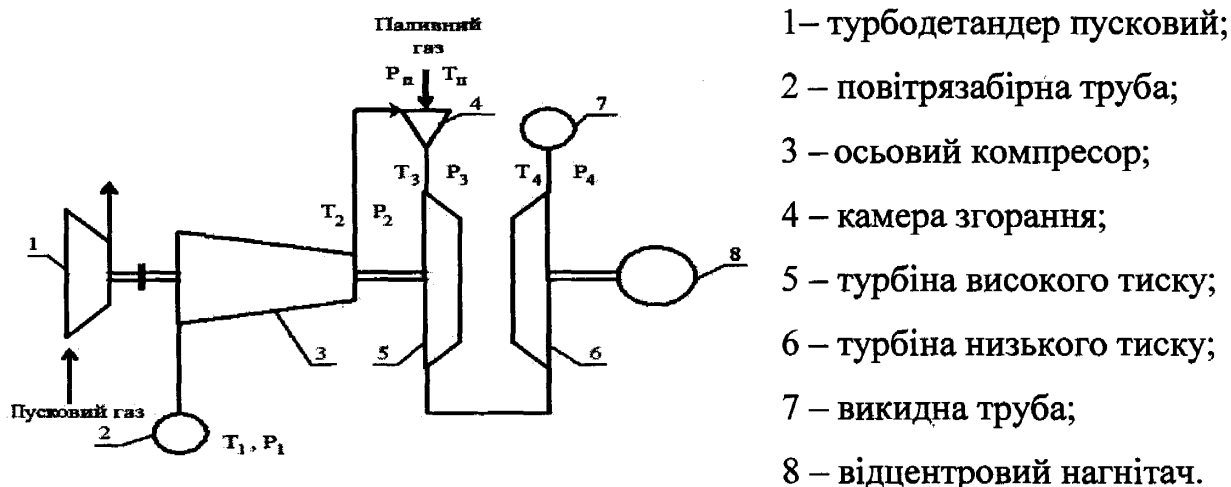


Рис. 2.2. Схема газового тракту ГТУ

На жодній з ділянок газового тракту газотурбінного агрегату не вимірюється ні витрата повітря, ні робочого тіла. Більш того, реєстрація витрати існуючими методами неприпустима, оскільки це призводить до гідравлічних втрат, що знизить потужність і економічність циклу. Єдиною витратою, яку можна виміряти на практиці, є витрата паливного газу. Очевидно, відомим можна вважати його компонентний склад.

Нижче наведено дослідження з розроблення математичної моделі діагностики камери згорання з урахуванням основних параметрів експлуатації ГТУ на різних технологічних режимах, які відрізняються температурою повітря на вході осьового компресора, температурою робочого тіла на вході в направляючий апарат турбіни високого тиску, а також температурою навколишнього середовища.

Основним елементом ГТУ, в якому відбувається процес приготування робочого тіла, є камера згорання, принципова розрахункова схема [110] якої подана на рис. 2.3.

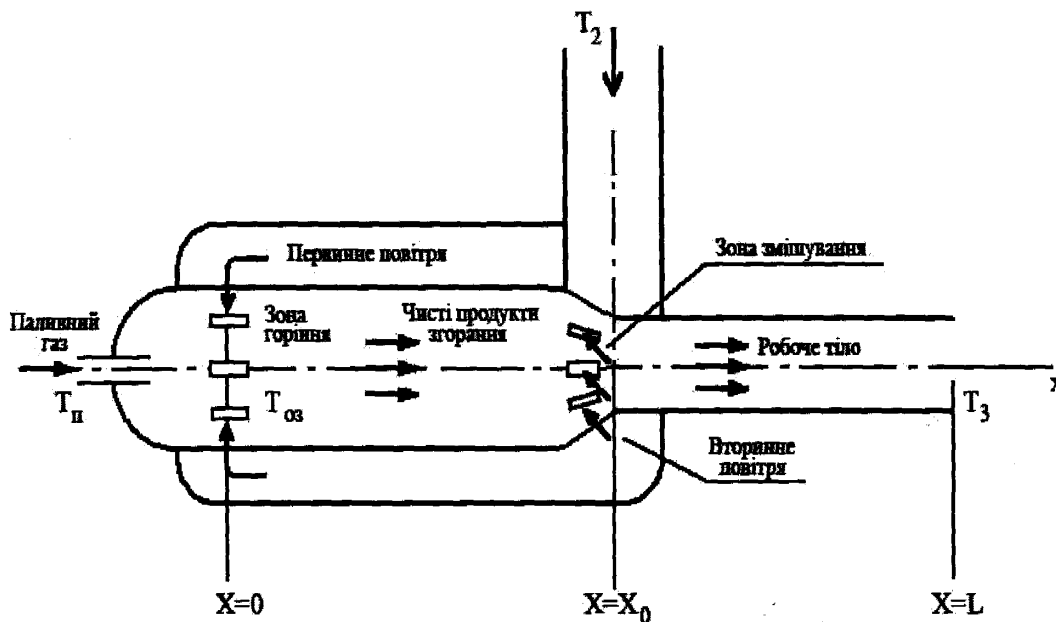


Рис. 2.3. Розрахункова схема камери згорання

Камера згорання газотурбінної установки призначена для приготування робочого тіла, яке в процесі розширення на лопатках турбіни виконуватиме корисну роботу. З цією метою в камері згорання відбувається процес горіння газового пального в середовищі первинного повітря з утворенням чистих продуктів згорання і процес їх змішування з вторинним повітрям для досягнення допустимої температури робочого тіла. Тому склад робочого тіла може бути умовно представлений у вигляді суміші чистих продуктів згорання з вторинним повітрям. Для характеристики робочого тіла вводять поняття коефіцієнта α надлишку повітря, який є відношенням сумарної витрати повітря (первинного L_0 і вторинного L) до витрати первинного повітря, теоретично необхідного для згорання 1 кг паливного газу [130]:

$$\alpha = \frac{L + L_0}{L_0} \quad (2.22)$$

Теоретично необхідна кількість повітря для спалювання 1 кг паливного газу відомого компонентного складу з щільністю ρ' може бути розрахована за формулою [130]:

$$L_o = \frac{1,293}{21\rho} [0,5(\text{CO}) + 0,5(\text{H}_2) + 2(\text{CH}_4) + \sum (m + n/4)(C_m H_n) + 1,5(\text{H}_2\text{S}) - (\text{O}_2)]. \quad (2.23)$$

Тут символи в дужках означають об'ємні частки кожного компонента в суміші газів.

Для визначення величини витрати робочого тіла на кожній ділянці газового тракту розглянемо тепловий баланс камери згорання [130] (у розрахунку на 1 кг паливного газу):

$$I_{ПГ} + I_{ПЕР} + I_{ГОР} = I_{ЧПЗ} + I_{ВТ}, \quad (2.24)$$

де $I_{ПГ}$ – ентальпія паливного газу, $I_{ПЕР}$ – ентальпія первинного повітря, $I_{ГОР}$ – збільшення ентальпії внаслідок згорання палива, $I_{ЧПЗ}$ – ентальпія чистих продуктів згорання, $I_{ВТ}$ – ентальпія вторинного повітря.

З розрахунку на 1 кг паливного газу заданого складу за коефіцієнта надлишку повітря α кожен член рівняння (2.24) матиме вигляд [130]:

$$\begin{aligned} I_{ПГ} &= C_{П} t_{П} \\ I_{ПЕР} &= C_p'' t_3 \\ I_{ГОР} &= Q_H^p \eta_{кc} \\ I_{ЧПЗ} &= \alpha L_0 C_p'' t_3 \\ I_{ВТ} &= \alpha L_0 C_p' t_2 \end{aligned}, \quad (2.25)$$

де $C_{П}$, C_p' , C_p'' – теплоємності відповідно паливного газу, повітря і робочого тіла; Q_H^p – нижча теплотворна здатність паливного газу, $\eta_{кc}$ – коефіцієнт корисної дії камери згорання.

На основі (2.24) можна визначити коефіцієнт надлишку повітря.

Зауважимо, що надлишок повітря в камері згорання в порівнянні з його теоретично необхідною кількістю призводить до охолодження робочого тіла. Коефіцієнт надлишку повітря пов'язаний з максимальною температурою циклу співвідношенням:

$$\alpha = \frac{Q_H^p \eta_{kc} + C_{\Pi} t_{\Pi} + C_{P'} t_3}{L_0 (C_{P'} t_3 - C_{P'} t_2)}. \quad (2.26)$$

Не вдаючись до визначення теплотворної здатності палива Q_H^p і його теплоємності C_{Π} , зазначимо, що на основі вимірів температур паливного газу t_{Π} , повітря після осьового компресора t_2 і робочого тіла перед газовою турбіною t_3 можна з (2.24) знайти коефіцієнт надлишку повітря. Тоді масову витрату робочого тіла і повітря можна виразити через масову витрату паливного газу:

$$M'' = \alpha(L_0 + 1)M_{\Pi} \quad (2.27)$$

$$M' = \alpha(L_0 - 1)M_{\Pi}. \quad (2.28)$$

Об'ємна витрата повітря, приведена до умов входу в перший ступінь осьового компресора:

$$Q_1 = \frac{L_0 (\alpha - 1) M_{\Pi}}{P_1} 287 T_1. \quad (2.29)$$

Отже, використовуючи (2.24) і (2.28), можна для кожного режиму роботи газотурбінного агрегату визначити продуктивність осьового компресора, що дозволить визначити діагностичні ознаки.

Однак для використання рівняння (2.24) необхідно визначити середні питомі теплоємності повітря C'_m у діапазоні температур (t_1, t_2) і робочого тіла $C''_{p'm}$ у діапазоні температур (t_4, t_3) . Якщо визначення теплоємності повітря, середньої у відомому діапазоні температур, не викликає утруднень, то визначення середньої масової теплоємності робочого тіла $C''_{p'm}$ не очевидно, оскільки невідомий склад робочого тіла. Тому для визначення коефіцієнта надлишку повітря варто застосувати метод послідовних наближень. Алгоритм розрахунку такий:

1. У першому наближенні задаються значенням теплоємності робочого тіла C''_{pm} , що дорівнює теплоємності повітря за тих самих умов:

$$C''_{pm} = C'_{pm}. \quad (2.30)$$

2. За залежністю (2.24) розраховують перше наближення коефіцієнта надлишку повітря.

3. Визначають масову витрату робочого тіла в розрахунку на 1 кг витрати паливного газу:

$$M'' = M_{CO_2} + M_{H_2O} + M_{N_2} + M_{O_2}, \quad (2.31)$$

де

$$\begin{aligned} M_{CO_2} &= \frac{0,44}{22,4} \left[(CO_2) + (CO) + \sum m(C_m H_n) \right], \\ M_{H_2O} &= \frac{0,18}{22,4} \left[(H_2) + 2(CH_4) + \sum \frac{n}{2} (C_m H_n) \right], \\ M_{N_2} &= 0,769 L_0 \alpha^{(1)}, \\ M_{O_2} &= 0,231 L_0 (\alpha^{(1)} - 1). \end{aligned} \quad (2.32)$$

4. Визначають масові частки кожного з зазначених компонентів у робочому тілі:

$$\begin{aligned} m_{CO_2} &= M_{CO_2} / M''; & m_{H_2O} &= M_{H_2O} / M''; \\ m_{O_2} &= M_{O_2} / M''; & m_{N_2} &= M_{N_2} / M''. \end{aligned} \quad (2.33)$$

5. Розраховують теплоємність робочого тіла:

$$C''_{pm} = m_{CO_2} C_{pm}^{CO_2} + m_{H_2O} C_{pm}^{H_2O} + m_{O_2} C_{pm}^{O_2} + m_{N_2} C_{pm}^{N_2}. \quad (2.34)$$

6. За залежністю (2.24) уточнюють значення коефіцієнта надлишку повітря і виконують розрахунки до досягнення заданої точності ε :

$$|\alpha^{i-1} - \alpha^i| < \varepsilon_0. \quad (2.35)$$

Складність процесів, що відбуваються в камері згорання, вимагає прийняття ряду припущень при формалізації. Так, для вузького діапазону зміни коефіцієнта надлишку повітря в зоні горіння камери згорання можна

припустити, що температура горіння не залежить від надлишку повітря і є постійною.

Математична модель камери згорання для умов нестационарного неізотермічного руху робочого тіла може бути представлена у вигляді основних рівнянь гідродинаміки [131]:

– рівняння зміни імпульсу:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\xi \rho w^2}{2d} + \rho g \frac{dh}{dx} = 0$$

– рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + c^2 \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} = 0$$

– рівняння енергії:

$$-\frac{\partial(\rho w)}{\partial x} (C_p T + \rho T \frac{\partial C_p}{\partial t} + \rho C_p) w - \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \lambda}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial \lambda}{\partial p} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{U \alpha}{F} (T_0 - T),$$

де P – тиск, T – температура, ρ – густина, w – лінійна швидкість, c – швидкість звуку в робочому тілі, ξ – коефіцієнт гідравлічного опору, C_p – ізобарна теплоємність, λ – теплопровідність, T_0 – температура довкілля, α – коефіцієнт теплопередачі від робочого тіла в довкілля, U – периметр, F – площа поперечного перерізу.

Якщо в рівнянні зміни імпульсу знехтувати гравітаційними втратами і перейти від швидкості до масової витрати M , то отримаємо:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\xi M^2}{2dF^2} + \frac{1}{F} \frac{\partial M}{\partial t} = 0. \quad (2.36)$$

У рівнянні нерозривності слід врахувати шляхову подачу вторинного повітря в потік робочого тіла в точці $x=x_0$. З цією метою використаємо функцію Дірака $\delta(x-x_0)$ і в остаточному підсумку отримаємо:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{c^2}{F} \left(\frac{\partial M}{\partial x} + \frac{M L_0 c^2}{F} (\alpha + 1) \delta(x - x_0) \right) = 0. \quad (2.37)$$

У рівнянні енергії знехтуємо впливом ефекту Джон-Томпсона та зміною теплопровідності робочого тіла, і, переходячи до масової витрати, отримаємо:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{M'}{\rho'F} \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{ML_0(\alpha+1)C'_p}{\rho''C''_pF} T_2 \delta(x-x_0) - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\pi D(T_0-T)}{\rho''C''_pF} = 0. \quad (2.38)$$

Отже, рівняння (2.36-2.38) створюють математичну модель камери згорання для умов нестационарної неізотермічної течії робочого тіла.

Зазначеними рівняннями задається зв'язок між основними параметрами робочого тіла (тиском P , температурою T і масовою витратою M) для різних моментів часу t і різних ділянок камери згорання, що характеризуються лінійною координатою x . На границі зони горіння і зони змішування ($x=x_0$) спостерігається ступінчате збільшення витрати, викликане подачею вторинного повітря з витратою M_1 . Отже, витрати робочого тіла як функція лінійної координати може бути виражена рівнянням:

$$M = M_1(L_0 + 1) + ML_0(\alpha - 1)\sigma(x - x_0), \quad (2.39)$$

де L_0 – теоретично необхідна кількість повітря для спалювання 1 кг палива;

α – коефіцієнт надлишку повітря;

$\sigma(x - x_0)$ – одинична функція Хевісайда;

$$\sigma(x - x_0) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x > x_0 \\ 0, & \text{якщо } x < x_0 \end{cases}. \quad (2.40)$$

Густина повітря ρ' , робочого тіла ρ'' і чистих продуктів згорання ρ за робочих умов у камері згорання можна виразити через тиск і температуру [130]:

$$\rho' = \frac{P}{R'T}, \quad \rho'' = \frac{P}{R''T}, \quad \rho = \frac{P}{RT}. \quad (2.41)$$

Система являє собою систему диференціальних рівнянь, що пов'язують параметри роботи камери згорання з її характерними розмірами і фізичними властивостями робочого тіла. До системи входять також коефіцієнт гідравлічного опору камери згорання ξ_k і коефіцієнт теплообміну з

навколишнім середовищем K . Практика експлуатації газотурбінних агрегатів показала, що саме ці коефіцієнти відображають реальний стан камери згорання. Отже, коефіцієнт гідравлічного опору камери згорання і повний коефіцієнт теплообміну з навколишнім середовищем K можуть бути використані як діагностичні ознаки.

Спрощення математичної моделі наведеної у формулах (2.36-2.38) для стаціонарного режиму виконано шляхом поділу газодинамічних і термодинамічних процесів.

Для стаціонарного газодинамічного процесу в камері згорання рівняння зміни імпульсу можна представити у вигляді:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{\xi_k M^2}{2D\rho F^2}. \quad (2.42)$$

Витрату робочого тіла можна визначити через виміряну витрату паливного газу M_2 і коефіцієнт надлишку повітря в камері згорання, розрахований за методикою, наведеною вище:

$$M'' = \alpha(L_0 + 1)M_{II}. \quad (2.43)$$

Середні тиск і температуру в зоні змішування визначають як середні арифметичні:

$$\begin{aligned} P_C &= \frac{1}{2}(P_2 + P_3) \\ T_C &= \frac{1}{2}(T_{2L} + T_3) \end{aligned} \quad (2.44)$$

де P_2, P_3 – тиски на вході і виході камери згорання, що визначаються шляхом вимірів; T_{2L} – температура повітря на вході в зону змішування камери згорання, принцип визначення якої буде викладено нижче; T_3 – виміряна температура на виході з камери згорання.

Тоді густина робочого тіла за середніх умов у камері згорання визначиться з рівняння стану:

$$\rho = \frac{P_c}{R'' T_c} . \quad (2.45)$$

Розв'язок (2.42) представлено у вигляді:

$$\frac{P_2 - P_3}{L} = \frac{\xi_k M''^2}{2\rho F^2} . \quad (2.46)$$

Із залежності (2.46) можна визначити коефіцієнт опору камери згорання у вигляді:

□□□□□□□□□□□□□□□□□□

$$\xi_k = 2\rho F^2 (P_2 - P_3) / (LM''^2) . \quad (2.47)$$

Стаціонарний теплообмін робочого тіла, що рухається в жаровій трубі після зони змішування з потоком вторинного повітря в умовах протитоку, має вигляд:

$$K_1 \pi D (T_3(x) - T_2(x)) dx = M'' c_p'' dT_3(x) , \quad (2.48)$$

де K_1 – коефіцієнт теплопередачі від робочого тіла до повітря; D – діаметр жарової труби (приведений); $M'' = M_n (L_0 + 1)\alpha$ – масова витрата робочого тіла; C'' – теплоємність робочого тіла за температури T_3 .

Стаціонарний теплообмін вторинного повітря з робочим тілом і навколишнім середовищем можна описати рівнянням:

$$K_1 \pi D (T_3(x) - T_2(x)) dx - K_2 \pi D_0 (T_2(x) - T_0(x)) dx = M' C_p' dT_2 , \quad (2.49)$$

де K_2 – коефіцієнт теплопередачі від вторинного повітря в навколишнє середовище через обшивку з приведеним діаметром D_0 за температури навколишнього середовища T_0 ; C_p – теплоємність повітря за температури T_2 .

Рівняння балансу тепла для зони горіння має вигляд:

$$T_{30} C_p'' (\alpha L_0 + 1) = \alpha L_0 C_p' T_{2L} + (\alpha_1 L_0 + 1) C_p T_{03}, \quad (2.50)$$

де T_{30} – температура робочого тіла на вході в зону змішування; T_{03} – температура факела в зоні горіння; T_{2L} – температура первинного повітря на вході в зону горіння, що надходить з коефіцієнтом надлишку α_1 ; C_p – теплоємність продуктів згорання за температури T_{03} .

Спільне рішення рівнянь (2.47) – (2.48) за заданих температури вторинного повітря на вході в камеру згорання T_2 і температури робочого тіла на вході в лопаті направляючого апарата турбіни високого тиску T_3 можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} &(((T_{2i} - T_{0i}) / (1 - W_T (K_T / W_m + K_0 / W_{II}) - \sqrt{Z_{OT} - 4R_{OT}} / 2K_T + T_{0i})) C_p'' (\alpha L_0 + 1) - \\ &(\alpha L_0 + 1) C_p T_{03} / \alpha L_0 - T_{0i} = 1 - W_T (K_T / W_m + K_0 / W_{II}) - \sqrt{Z_{OT} - 4R_{OT}} / 2K_T) \\ &(T_{3i} - T_{0i} - (\alpha_1 L_0 + 1) C_p T_{03} / \alpha L_0 - T_{0i} (\exp(-((K_T / W_m + K_0 / W_{II}) + \\ &\sqrt{Z_{OT} - 4R_{OT}} \frac{L}{2} - (\exp(-((K_T / W_m + K_0 / W_{II}) - \sqrt{Z_{OT} - 4R_{OT}} \frac{L}{2}))), \end{aligned} \quad (2.51)$$

де $R_{OT} = K_0 K_T / W_T W_{II}$, $Z_{OT} = K_T / W_m + K_0 / W_m$;

W_{II}, W_T – водяні еквіваленти повітря і робочого тіла відповідно;

$$W_{II} = C_p'' M \quad W_T = C_p'' M''; \quad (2.52)$$

W_m – змішаний водяний еквівалент;

$$W_m = W_{II}'' W_T / (W_{II} + W_T), \quad (2.53)$$

K_T, K_0 – приведені коефіцієнти теплопередачі від робочого тіла до вторинного повітря і від вторинного повітря в навколишнє середовище.

Наведена математична модель процесів горіння камери згорання дасть можливість не тільки визначити основні характеристики камери згорання, але і

проводити дослідження основних технологічних режимів щодо зменшення викидів в атмосферу забруднювальних речовин прилеглих територій КС.

Такий підхід дозволить провести різноманітні розрахунки й дослідження, а також визначити номінальні показники викидних продуктів згорання та побудувати екологічні характеристики на різних робочих режимах ГТУ.

Висновки до розділу

1. За аналізом структури та обсягів викидів забруднювальних речовин на КС найбільш актуальним з точки зору екологічної безпеки є вивчення і вдосконалення процесів згорання газу та прогнозування утворення оксидів вуглецю та оксидів азоту під час роботи ГПА.

2. Зменшення концентрацій забруднювальних речовин під час роботи ГПА можна досягнути шляхом оптимізації режимів роботи ГПА, а також розроблення та застосування спеціальних заходів і засобів утилізації та знешкодження димових газів. При цьому слід врахувати, що жоден з робочих параметрів ГПА не може бути визначальним, через взаємопов'язаність останніх, а спеціальні заходи та засоби утилізації або знешкодження димових газів не повинні впливати на експлуатаційні характеристики ГПА.

3. Розроблена математична модель дозволяє визначити приведені коефіцієнти теплопередачі K_{Π} і K_0 (від робочого тіла до вторинного повітря і від вторинного повітря в навколишнє середовище), а також температуру вторинного повітря на вході в зону змішування камери згорання T_{2L} , якщо відомі параметри експлуатації ГТУ на трьох режимах. При цьому технологічні режими, за параметрами яких проводять діагностику камери згорання, повинні відрізнятися температурою повітря на вході осьового компресора, температурою робочого тіла на вході в направляючий апарат турбіни високого тиску, а також умовами навколишнього середовища при виконанні умови стаціонарності роботи ГТУ на кожному з режимів.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ УТВОРЕННЯ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН ЗА РІЗНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ

Проведене комплексне еколого-технічне обстеження роботи газоперекачувального агрегату на різних режимах дало можливість встановити величини концентрацій викидних газів оксидів і діоксидів азоту й оксиду вуглецю. Отримані нові багатофакторні прогностичні залежності зміни концентрації викидних газів від потужності газоперекачувального агрегату, коефіцієнта надлишку повітря, температури згорання газу, витрати газу, які можуть використовуватися для прогнозування викидів шкідливих речовин в атмосферу.

3.1. Методика проведення досліджень

Комплексне екологічне дослідження основних характеристик ГПА проводили під час роботи ГПА на різних робочих режимах у межах обмежень, передбачених конкретними технологічними умовами [132]. Параметри вимірювали на різних режимах роботи в діапазоні навантажень від 50 % до максимальної потужності, яка визначена умовами випробувань за температури зовнішнього повітря і режимом роботи компресорної станції. При цьому режими встановлювали шляхом переходів з меншого навантаження на велике і навпаки.

Вимірювання проводили на сталих режимах, тобто, коли відхилення основних величин у межах дослідження не виходило за межі вимог [133] після стабілізації режиму (зокрема, температура циркуляційного повітря і продуктів згорання ± 1 % тощо).

На кожному режимі дослідів проводили не менше ніж три заміри, сумарний час дослідів тривав не менше ніж 20 хв. При проведенні випробувань у холодну пору року необхідно забезпечити досягнення температури продуктів згорання в перерізі її штатного виміру до значення, близького до номінального, шляхом подачі гарячого повітря, або продуктів згорання у всмоктувальний тракт компресора або шляхом включення протизамерзальної системи.

У викидних газах ГПА проводився вимір концентрацій: оксидів азоту NO_x і оксиду вуглецю CO . Одночасно на режимах випробувань реєструвалися основні теплотехнічні параметри ГПА.

За результатами вимірів роботи для номінального режиму визначили такі показники:

- фактичні концентрації в сухих продуктах згорання, мг/м^3 ;
- приведені концентрації (за умови концентрації кисню 15 %) в сухих продуктах згорання за температури 0°C і тиску $0,1013\text{ МПа}$, мг/м^3 ;
- температуру продуктів згорання, $^\circ\text{C}$, $^\circ\text{K}$.

Номінальний режим за [134] для станційних умов: розрахункові температура, тиск і відносна вологість атмосферного повітря відповідно дорівнюють: $+15^\circ\text{C}$, $0, 10\text{-}13\text{ МПа}$ та 60% з урахуванням гідравлічних опорів вхідного і вихідного тракту, за відсутності теплообмінника утилізації та відбору стиснутого повітря. За наявності двопотокової викидної системи вимірювання проводили в обох газоходах з наступним усередненням результатів вимірювання.

3.2. Результати дослідження еколого-технічних характеристик роботи ГПА

Комплексне екологічне обстеження характеристик газотурбінного ГПА проводили на ГПА типу ГТК-10І на компресорній станції Богородчанського лінійно-виробничого управління магістральних газопроводів.

Концентрації оксидів азоту і вуглецю визначались у викидах за допомогою способів, зазначених у розділі 2. За основну одиницю вимірювання концентрації забруднювальної речовини брали мг/м^3 (м^3 при $0\text{ }^\circ\text{C}$ і $0,1013\text{ МПа}$).

Залежно від робочих режимів технологічні фактори змінювались у таких межах: потужність – 6034-8649 кВт, температура згорання – 550-770,2 $^\circ\text{C}$, коефіцієнт надлишку повітря – 1-1,62, витрати газу 1390-3187 $\text{м}^3/\text{год}$. При цьому було одержано різні значення показників токсичності продуктів згорання, які змінювались в межах: оксид азоту NO – 32,2-68,5 мг/м^3 , діоксид азоту NO_2 – 16,2-43 мг/м^3 , оксид вуглецю CO – 70,4-480,2 мг/м^3 .

За результатами вимірювань (табл. 3.1) на різних режимах були побудовані базові залежності зміни концентрацій оксидів азоту C_{NO} , C_{NO_2} та оксиду вуглецю C_{CO} залежно від витрат Q газу, коефіцієнта α надлишку повітря, потужності P та температури T_3 згорання.

Таблиця 3.1

Зміна викидів оксиду азоту, діоксиду азоту та оксиду вуглецю за різних параметрів роботи газоперекачувального агрегату ГТК-101

№ досліджу	Режимно-технологічні характеристики роботи ГПА				Концентрація викидів шкідливих речовин, мг/м^3		
	Потужність P , кВт	Температура згорання T_3 , $^\circ\text{C}$	Коефіцієнт надлишку повітря, α	Витрати газу Q , $\text{м}^3/\text{год}$	Оксид азоту NO	Діоксид азоту NO_2	Оксид вуглецю CO
1	8649	654,2	1,13	3153	52,3	20,4	304,3
2	8478	550	1,00	3178	34,2	25,2	480,2
3	8439	692	1,15	3187	50,4	31,2	287,2
4	8378	710,2	1,34	3127	62,1	38,7	153,2
5	8324	745,2	1,52	3056	68,2	42	103

Продовження таблиці 3.1.

№ досліду	Режимно-технологічні характеристики роботи ГПА				Концентрація викидів шкідливих речовин, мг/м ³		
	Потужність П, кВт	Температура згорання Tз, °С	Коефіцієнт надлишку повітря, α	Витрати газу Q, м ³ /год	Оксид азоту NO	Діоксид азоту NO ₂	Оксид вуглецю CO
6	8283	652,3	1,13	3075	39,1	25,7	125,9
7	8214	695,2	1,34	2754	61,3	32,4	140,2
8	8156	770,2	1,48	2958	68,5	42,1	163,2
9	8146	754,2	1,39	2864	55,4	42,3	145,2
10	8125	674,2	1,31	2854	62,8	24,2	148,2
11	8104	624,1	1,39	2963	60,2	32	154,2
12	8092	684,2	1,15	2956	48,7	22,1	274,5
13	8064	639,2	1,17	2985	49,1	28,2	230
14	7912	705	1,28	2964	51,8	32,2	185
15	7832	761,4	1,49	2856	65,2	43	107,5
16	7725	609,3	1,13	2754	42,2	22,2	241,3
17	7624	754,2	1,45	2785	58,2	36,2	124,3
18	7583	721,3	1,45	3021	62,3	35,1	148,3
19	7542	604,6	1,13	2854	44,5	22,1	70,4
20	7528	712,3	1,15	2923	42,2	23,4	325,2
21	7496	627,2	1,08	2856	32,2	23,8	368,2
22	7452	640	1,19	2754	38,2	24,1	256,3
23	7402	705,6	1,40	2653	59,6	34,3	100,2
24	7360	625	1,08	2743	34,3	20,7	357,6
25	7310	684,05	1,50	2631	63,2	32,6	110,2
26	7289	695,2	1,15	2742	40,2	24,3	205,1
27	7256	632	1,08	2647	42,3	18,6	263,2
28	7215	635,2	1,15	2748	42,7	25,5	186,3
29	7188	654,3	1,26	2777	53,3	32,6	252,6
30	7152	763,2	1,53	2856	65,2	38,3	204,3
31	7135	695,6	1,15	2649	41,3	27,9	179,5
32	6956	705,6	1,37	2756	52,1	36,5	148,3

Продовження таблиці 3.1.

№ досліджу	Режимно-технологічні характеристики роботи ГПА				Концентрація викидів шкідливих речовин, мг/м ³		
	Потужність П, кВт	Температура згорання Tз, °С	Коефіцієнт надлишку повітря, α	Витрати газу Q, м ³ /год	Оксид азоту NO	Діоксид азоту NO ₂	Оксид вуглецю CO
33	6875	654,2	1,18	2954	54,7	27,1	138,2
34	6682	748,65	1,30	2640	54	19,8	180
35	6542	728,6	1,33	2280	57	25,3	250
36	6423	585,2	1,16	2560	42,3	24,1	230,4
37	6380	720	1,20	2480	47,5	35,2	248,2
38	6314	745,2	1,40	3045	54,6	20,5	201,5
39	6254	741,2	1,52	2750	62,3	34,5	185,7
40	6232	620,1	1,08	2350	34,1	16,2	402,6
41	6184	660,3	1,19	2693	42,3	25,3	274,2
42	6148	645,2	1,41	2140	54,4	24,2	231,6
43	6135	618,6	1,15	1756	48,3	22,1	241
44	6108	710,3	1,48	1832	67,5	32,2	164
45	6085	750,2	1,50	1652	55,4	33,5	155
46	6078	705,4	1,21	1942	52,1	20,3	200,4
47	6060	700,3	1,21	1986	57,8	25,3	223,1
48	6060	750	1,34	2054	46,1	35,6	126,5
49	6052	622,3	1,15	1840	44,2	27,8	287,2
50	6047	640	1,00	1756	58,3	24,9	456,1
51	6042	758,2	1,57	1527	58	29,8	89,2
52	6034	732,5	1,62	1390	57,3	29,3	85,4

На основі одержаних парних зв'язків виведені однофакторні та багатофакторні рівняння регресії для дослідження впливу перелічених факторів на концентрацію викидних продуктів згорання, поданих на рис. 3.1-3.12.

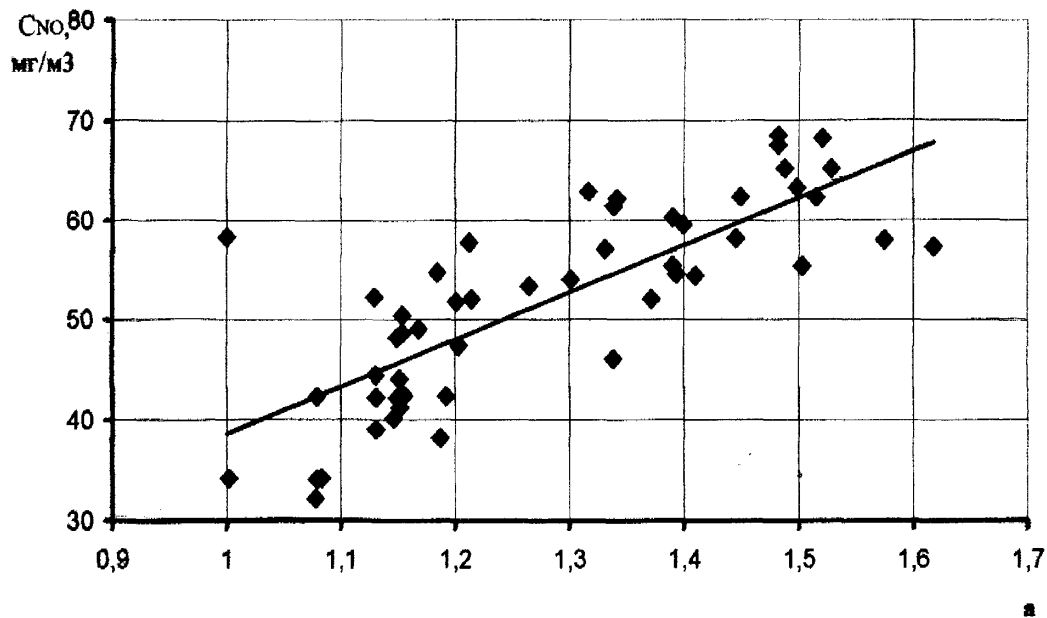


Рис. 3.1. Парний взаємозв'язок залежності концентрації оксиду азоту C_{NO} та коефіцієнта α надлишку повітря

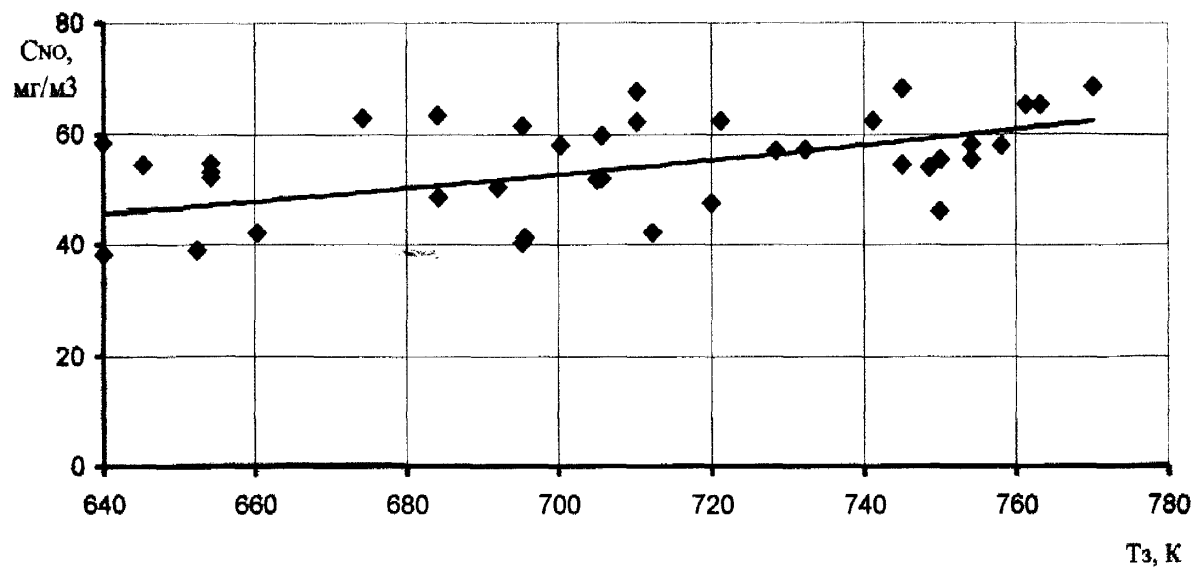


Рис. 3.2. Парний взаємозв'язок залежності концентрації C_{NO} оксиду азоту та температури T_z продуктів згорання

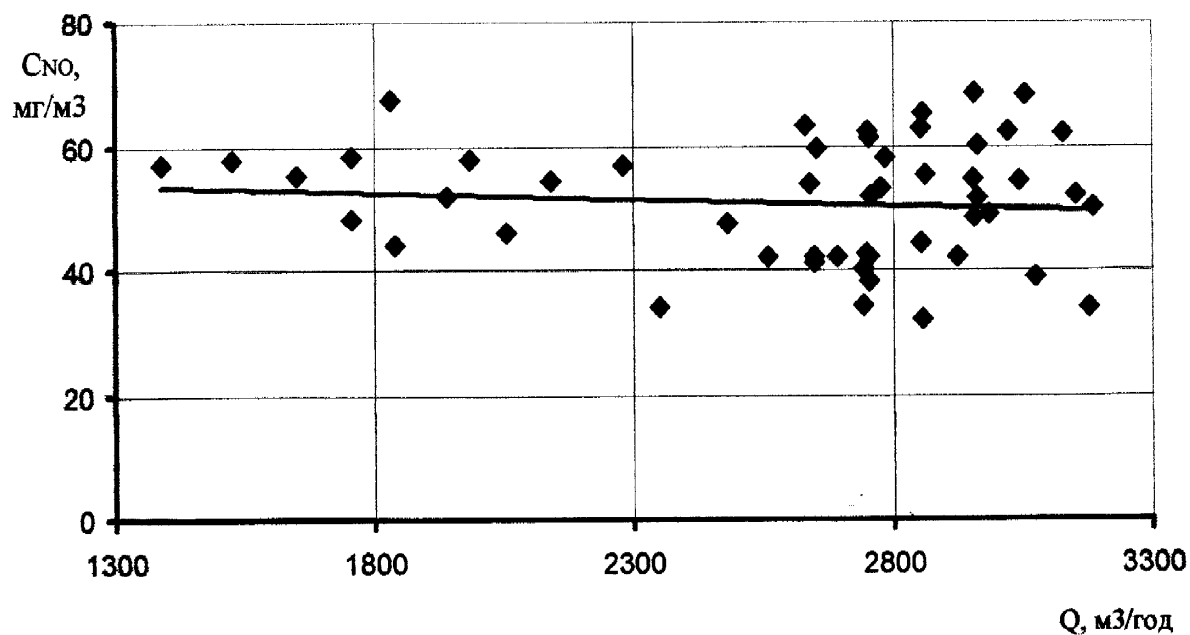


Рис. 3.3. Парний взаємозв'язок залежності концентрації C_{NO} оксиду азоту та витрати Q газу

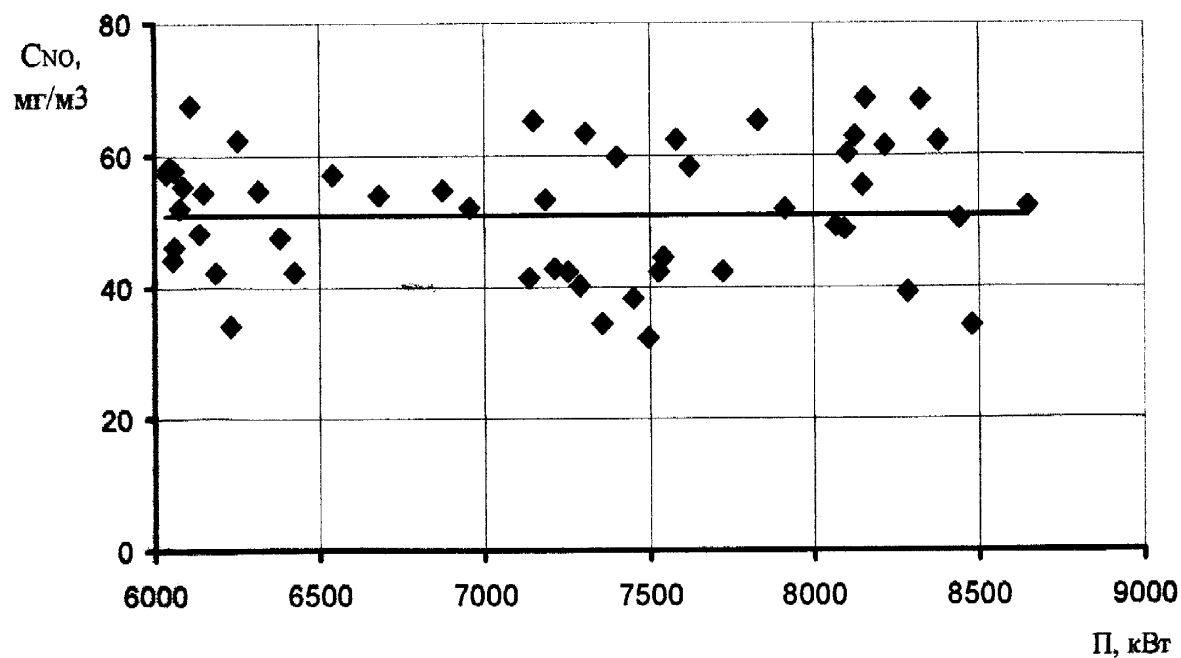


Рис. 3.4. Парний взаємозв'язок залежності концентрації C_{NO} оксиду азоту та потужності P газотурбінного агрегату

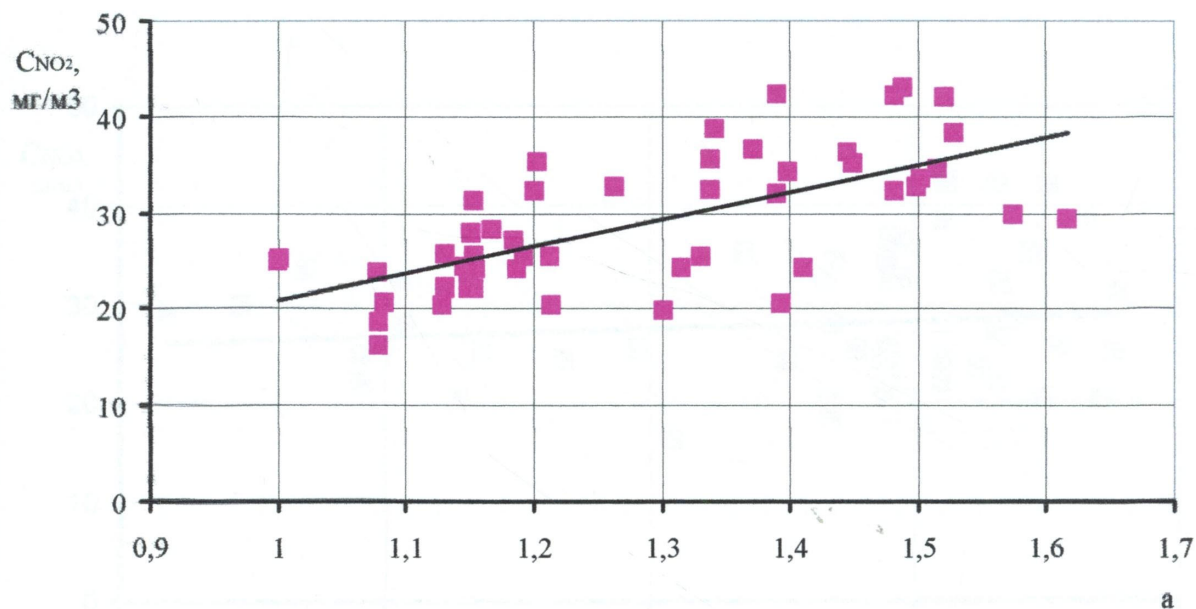


Рис. 3.5. Парний взаємозв'язок залежності концентрації C_{NO_2} діоксиду азоту та коефіцієнта α надлишку повітря

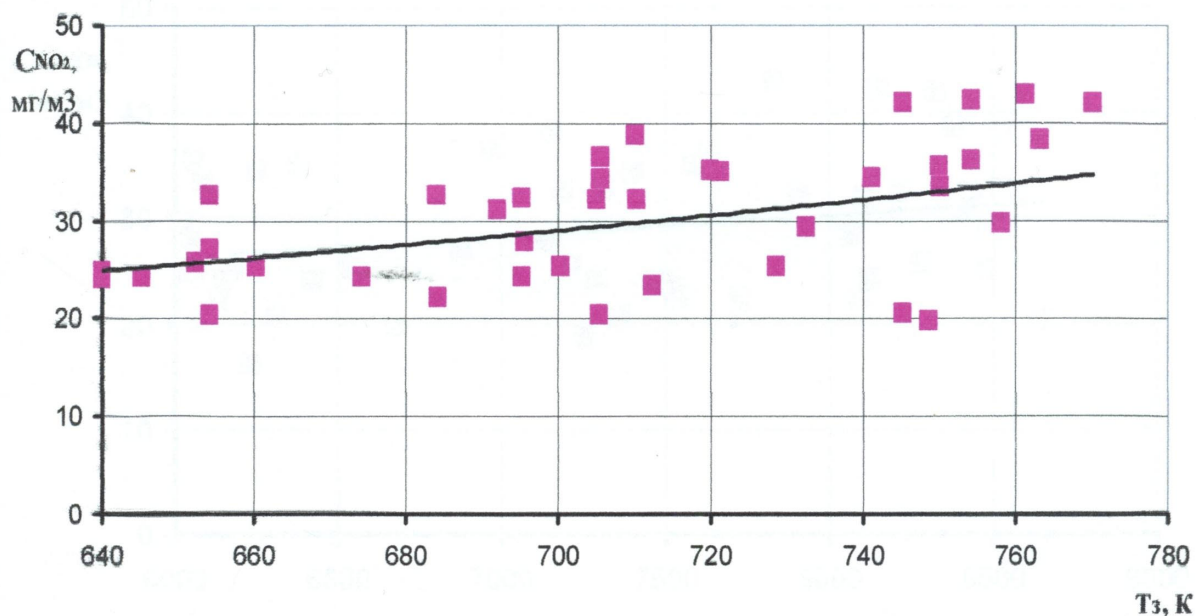


Рис. 3.6. Парний взаємозв'язок залежності концентрації C_{NO_2} діоксиду азоту та температури T_z продуктів згорання

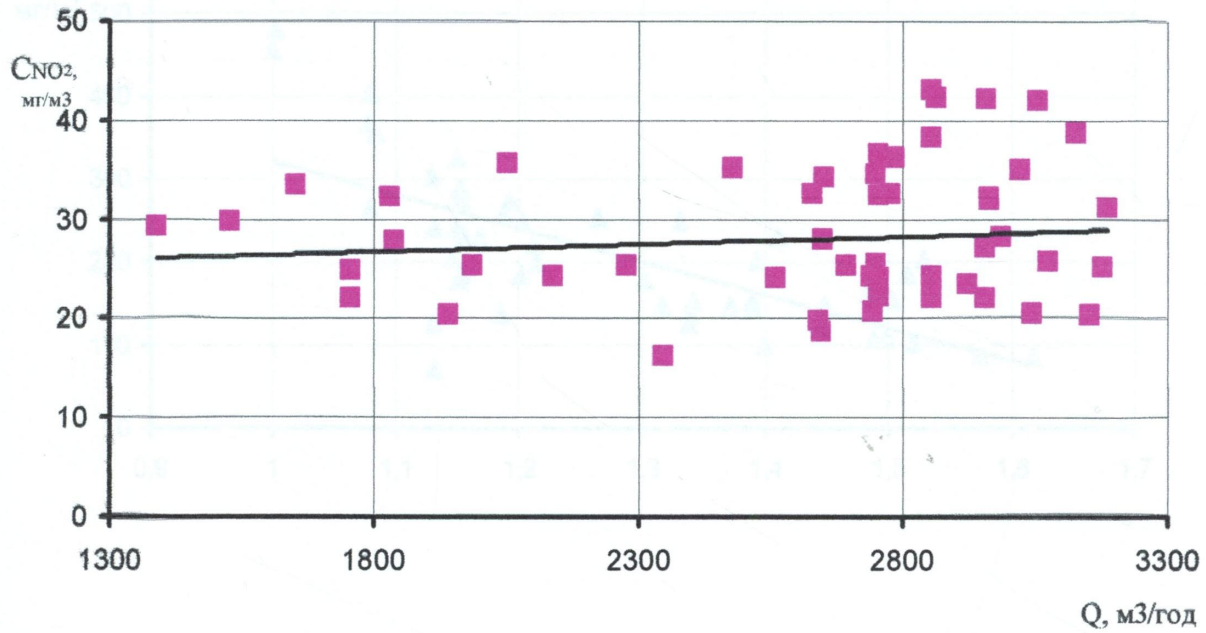


Рис. 3.7. Парний взаємозв'язок залежності концентрації C_{NO_2} діоксиду азоту та витрати Q газу

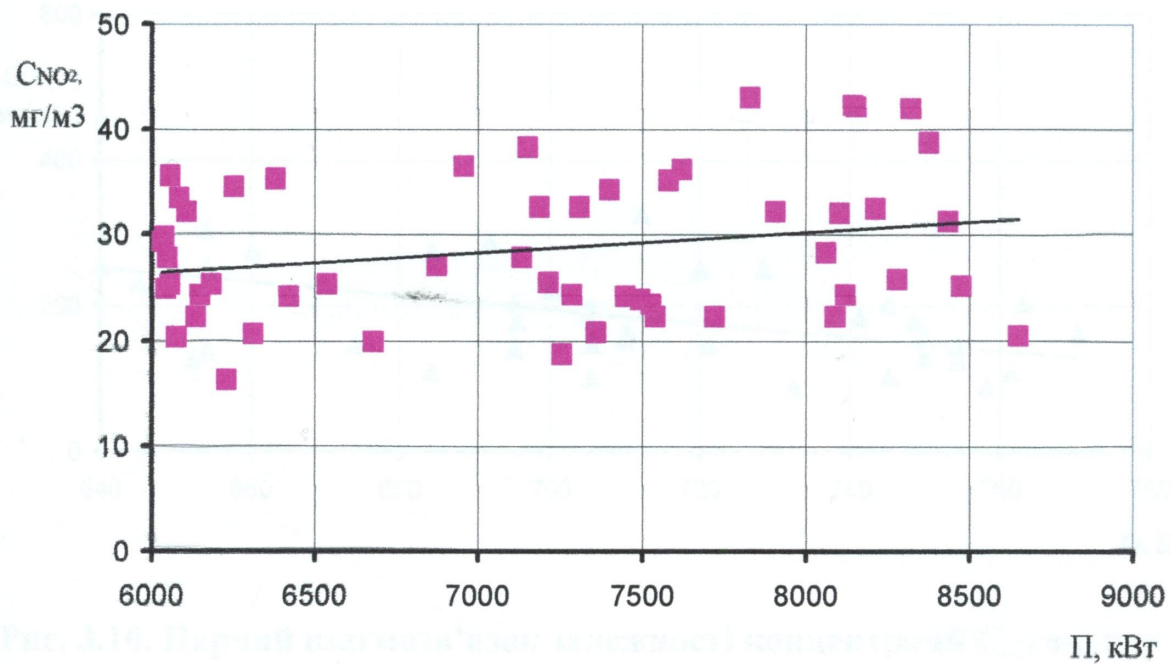


Рис. 3.8. Парний взаємозв'язок залежності концентрації C_{NO_2} діоксиду азоту та потужності P газотурбінного агрегату

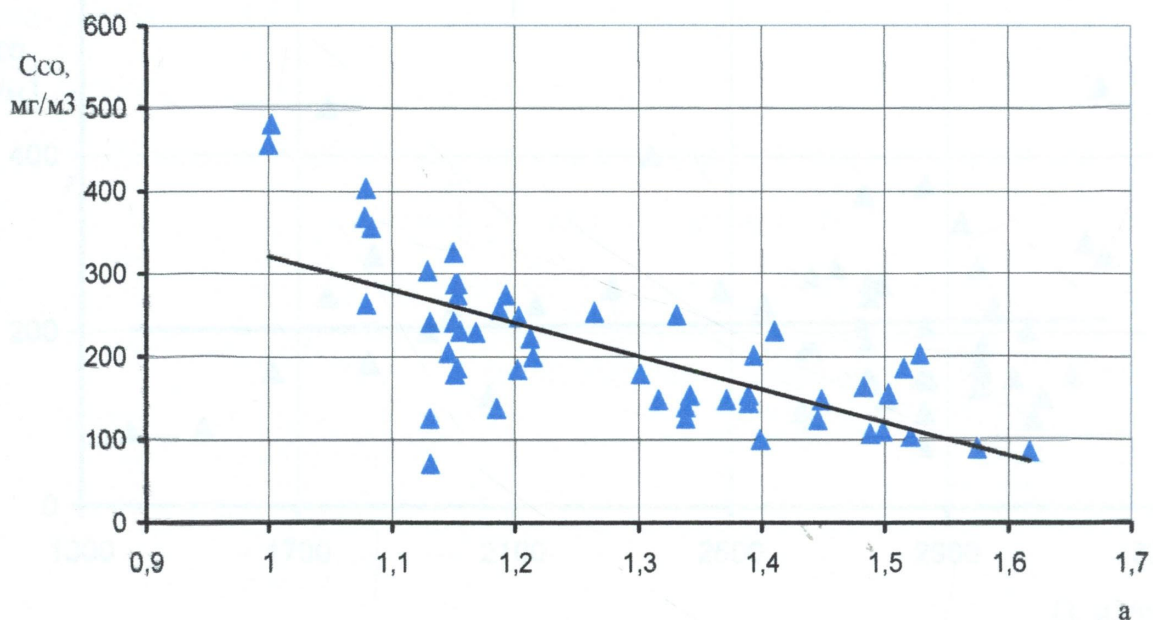


Рис. 3.9. Парний взаємозв'язок залежності концентрації C_{CO} оксиду вуглецю та коефіцієнта α надлишку повітря

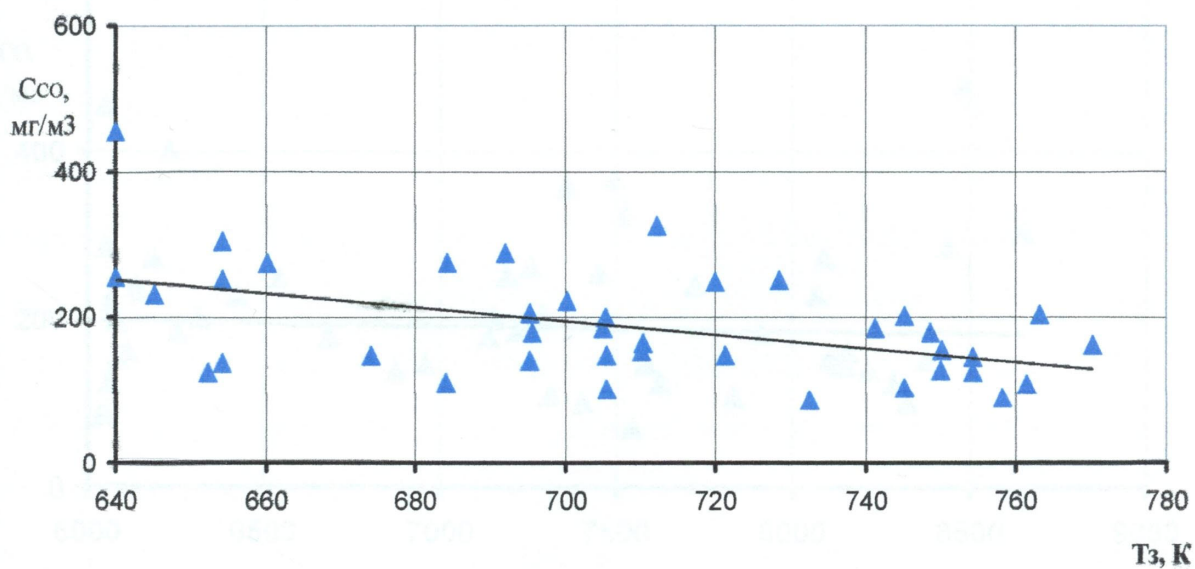


Рис. 3.10. Парний взаємозв'язок залежності концентрації C_{CO} оксиду вуглецю та температури T_z продуктів згорання

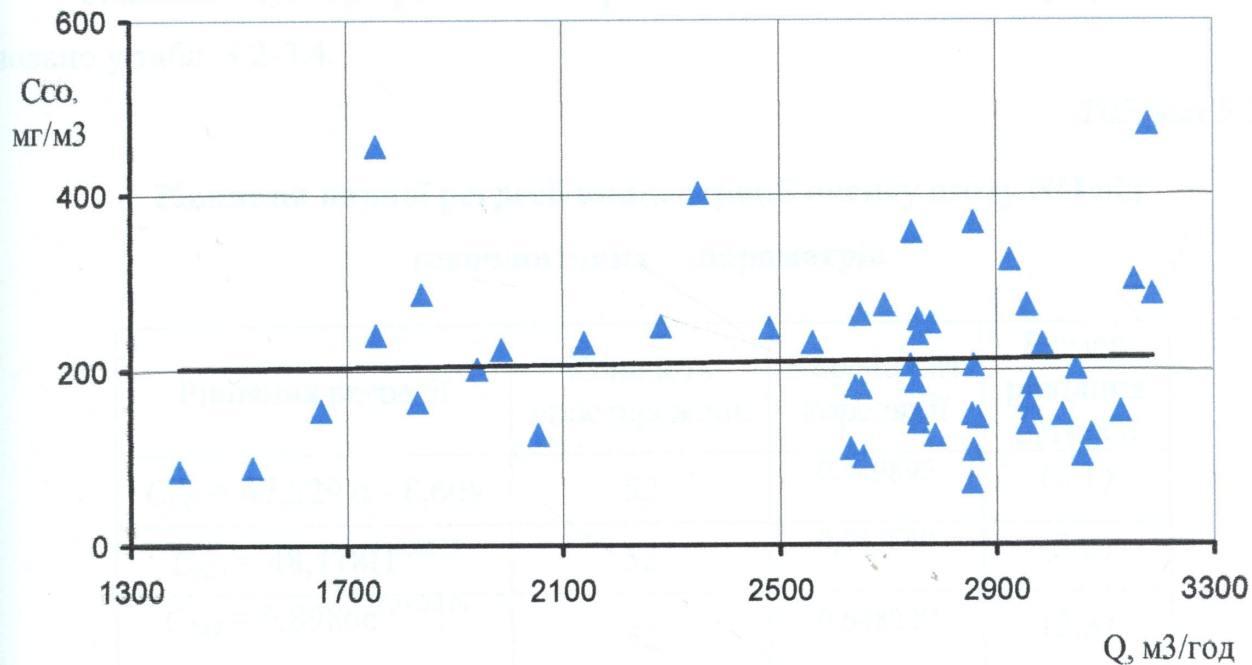


Рис. 3.11. Парний взаємозв'язок залежності концентрації C_{CO} оксиду вуглецю та витрати Q газу

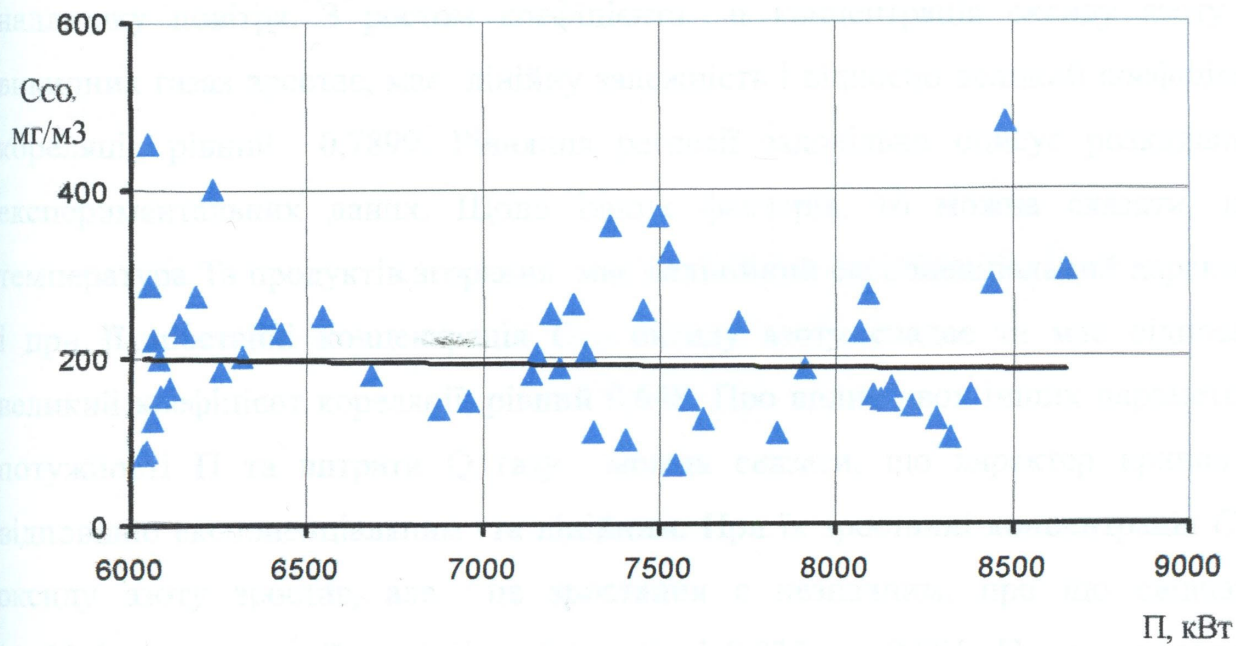


Рис. 3.12. Парний взаємозв'язок залежності концентрації C_{CO} оксиду вуглецю та потужності P газотурбінного агрегату

Рівняння парної регресії концентрації оксидів азоту та оксиду вуглецю подано у табл. 3.2-3.4.

Таблиця 3.2

Рівняння парної регресії концентрації оксиду азоту NO від технологічних параметрів

Рівняння регресії	Кількість спостережень	Коефіцієнт кореляції	Номер рівняння регресії
$C_{NO} = 47,229 \alpha - 8,608$	52	0,789895	(3.1)
$C_{NO} = 48,478\Pi^{0,0053}$	52	0,035649	(3.2)
$C_{NO} = 9,8986e^{0,0024Tз}$	52	0,648229	(3.3)
$C_{NO} = 56,753e^{-4E-05Q}$	52	-0,08125	(3.4)

З проведених досліджень встановлено, що на концентрацію C_{NO} викидів оксидів азоту (рис. 3.1-3.4 та табл. 3.2) найбільший вплив має коефіцієнт α надлишку повітря. З ростом коефіцієнта α концентрація оксиду азоту в викидних газах зростає, має лінійну залежність і відносно великий коефіцієнт кореляції, рівний 0,7899. Рівняння регресії задовільно описує розкидання експериментальних даних. Щодо інших факторів, то можна сказати, що температура $Tз$ продуктів згорання має нелінійний експоненціальний характер і при її зростанні концентрація C_{NO} оксиду азоту спадає та має відносно великий коефіцієнт кореляції, рівний 0,648. Про вплив двох інших параметрів потужності Π та витрати Q газу можна сказати, що характер кривих є відповідно експоненціальним та лінійним. При їх зростанні концентрація C_{NO} оксиду азоту зростає, але це зростання є незначним, про що свідчать коефіцієнти кореляції, які відповідно рівні 0,035 та -0,081. Проте не можна стверджувати, що ці параметри не мають впливу на концентрацію C_{NO} оксиду азоту. Потрібно дослідити їх взаємний вплив, тому що парний зв'язок не може бути таким тісним, як у комплексі.

Таблиця 3.3

Рівняння парної регресії концентрації оксиду азоту NO_2 від технологічних параметрів

Рівняння регресії	Кількість спостережень	Коефіцієнт кореляції	Номер рівняння регресії
$C_{NO_2} = 28,019 \alpha - 7,104$	52	0,669387	(3.5)
$C_{NO_2} = 0,0019П + 14,953$	52	0,238202	(3.6)
$C_{NO_2} = 4,7752e^{0,0026T_3}$	52	0,61137	(3.7)
$C_{NO_2} = 24,16e^{6E-05Q}$	52	0,133021	(3.8)

Аналізуючи парні зв'язки для зміни концентрації C_{NO_2} діоксидів азоту (рис. 3.5-3.8 та табл. 3.3), можна зазначити, що зміна коефіцієнта α надлишку повітря характеризується лінійним зв'язком. При зростанні α концентрація C_{NO_2} викидів діоксидів азоту зростає в межах від 24 мг/м³ до 38 мг/м³. Про це свідчить коефіцієнт кореляції, який є дуже високий у порівнянні з коефіцієнтами кореляції інших залежностей. Збільшенню концентрації C_{NO_2} викидів діоксиду азоту сприяє збільшення температури T_3 продуктів згорання. Коефіцієнт кореляції, рівний 0,611, вказує на тісний зв'язок між цими параметрами.

Щодо впливу двох інших параметрів: потужності $П$ та витрати Q газу, то їх зміну характеризують нелінійна залежність, а саме експоненціальна, від витрати Q газу з відносно низьким коефіцієнтом кореляції 0,133, та лінійна залежність для потужності $П$ з коефіцієнтом кореляції 0,238, які вказують на те, що ці параметри в парній кореляції мають вплив на концентрацію C_{NO_2} діоксиду азоту, хоча він не такий суттєвий. Тому потрібно розглянути їх сумісний вплив на концентрацію C_{NO_2} викидів газів.

Таблиця 3.4

Рівняння парної регресії концентрації оксиду вуглецю CO від технологічних параметрів

Рівняння регресії	Кількість спостережень	Коефіцієнт кореляції	Номер рівняння регресії
$C_{CO} = -398,76 \alpha + 719,56$	52	-0,70798	(3.9)
$C_{CO} = -0,9391T_3 + 853,06$	52	-0,55262	(3.10)
$C_{CO} = 1503,4\Pi^{0,232}$	52	-0,04387	(3.11)
$C_{CO} = 0,0073Q + 190,72$	52	0,037456	(3.12)

Для оксиду вуглецю (рис. 3.9-3.12 та табл. 3.4) найбільший вплив на концентрацію C_{CO} викидів цього газу має коефіцієнт α надлишку повітря, для якого характерна спадна лінійна залежність. Із зростанням коефіцієнта α концентрація C_{CO} газу оксиду вуглецю зменшується в межах від 280 мг/м³ до 80 мг/м³. Коефіцієнт кореляції для залежності зміни концентрації оксиду вуглецю від коефіцієнта α рівний -0,708, що вказує на тісний зв'язок між цими параметрами.

Суттєвий вплив на концентрацію C_{CO} викидів оксиду вуглецю має також температура T_3 продуктів згорання, яка змінюється за лінійною залежністю при зростанні концентрації C_{CO} . Коефіцієнт кореляції рівний -0,552 і також має вплив на неї.

Про вплив двох інших параметрів можна сказати, що він не суттєвий, про що свідчать малі величини коефіцієнтів кореляції: відповідно -0,0438 для потужності Π та 0,0374 для витрати Q газу.

Концентрація C_{CO} викидів оксиду вуглецю при зростанні витрати Q газу зростає в межах від 150 до 250 мг/м³. При зростанні потужності Π залежність носить степеневий характер із зменшенням концентрації C_{CO} оксиду вуглецю.

За аналізом одержаних експериментальних даних та проведенням парним регресійним аналізом встановлено, що найбільший вплив на концентрацію C_{NO} , C_{NO_2} , C_{CO} викидних газів мають коефіцієнт α надлишку повітря та температура T_3 продуктів згорання, які мають високі коефіцієнти кореляції та адекватно описують експериментальні дані. Щодо двох інших параметрів: потужності P та витрати Q газу, не можна стверджувати, що вони не мають впливу на концентрацію викидів чи цей вплив є дуже малим. Між цими параметрами існують тісні взаємозв'язки, тому їх вплив на концентрацію викидних газів є комплексним.

Із експериментальних даних видно, що між технологічними параметрами та викидними продуктами згорання немає чіткого функціонального зв'язку. Тому для дослідження комплексного впливу перелічених параметрів використали багатофакторний кореляційно-регресійний аналіз [135, 136], що дає можливість оцінити міру впливу на концентрацію викидних газів, якщо змінюється кожен із параметрів процесу і фіксовані на середньому рівні інші параметри, тобто знайти аналітичний вираз, котрий якнайкраще відображає зв'язок факторних ознак з результативною, тобто знайти функцію:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_p, a_0, a_1, \dots, a_p), \quad (3.13)$$

де a_0, a_1, \dots, a_n – коефіцієнти рівняння регресії, яка забезпечує найменший розкид емпіричних точок відносно поверхні, яку описує ця функція.

Врахувавши те, що емпіричне обґрунтування типу функції за допомогою графічного аналізу зв'язків для багатофакторних моделей майже непридатне, а підбір функцій різних типів пов'язаний з великою кількістю зайвих обчислень, а також зважаючи на те, що будь-яку функцію багатьох змінних шляхом логарифмування або заміни змінних можна звести до лінійного вигляду, рівняння множинної регресії можна виразити у лінійній формі у вигляді:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \dots + a_n x_n. \quad (3.14)$$

У нашому випадку за результативну ознаку ми прийняли відповідно концентрації викидних газів; за факторні ознаки – відповідно потужність, температуру продуктів згорання, коефіцієнт надлишку повітря, витрату газу. Отже, рівняння лінійної чотирифакторної регресії отримаємо у вигляді:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4, \quad (3.15)$$

де y – розрахункові значення результативної ознаки – функції концентрації C_{NO} , C_{NO_2} , C_{CO} викидних газів; x_1, x_2, x_3, x_4 – факторні ознаки, причому $x_1 = P$; $x_2 = T_3$; $x_3 = \alpha$; $x_4 = Q$; a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 – параметри рівняння, які обчислимо методом найменших квадратів, розв'язавши систему рівнянь:

$$\begin{cases} na_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 + a_3 \sum x_3 + a_4 \sum x_4 = \sum y; \\ a_0 \sum x_1 + a_1 \sum x_1^2 + a_2 \sum x_1 x_2 + a_3 \sum x_1 x_3 + a_4 \sum x_1 x_4 = \sum x_1 y; \\ a_0 \sum x_2 + a_1 \sum x_1 x_2 + a_2 \sum x_2^2 + a_3 \sum x_2 x_3 + a_4 \sum x_2 x_4 = \sum x_2 y; \\ a_0 \sum x_3 + a_1 \sum x_1 x_3 + a_2 \sum x_2 x_3 + a_3 \sum x_3^2 + a_4 \sum x_3 x_4 = \sum x_3 y; \\ a_0 \sum x_4 + a_1 \sum x_1 x_4 + a_2 \sum x_2 x_4 + a_3 \sum x_3 x_4 + a_4 \sum x_4^2 = \sum x_4 y; \end{cases} \quad (3.16)$$

Кожний коефіцієнт рівняння (3.16) вказує на ступінь впливу відповідного фактора на результативний показник при фіксованому положенні решти факторів, тобто вказує, як зі зміною окремого фактора на одиницю змінюється результативний показник.

Вибірковий коефіцієнт кореляції та вибіркові оцінки a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 параметрів регресії, які обчислені за обмеженою кількістю експериментальних даних, містять елементи випадковості, а вони самі за своєю суттю, є випадковими величинами. У зв'язку з цим виникає потреба перевірити значимість цих вибірових характеристик.

Критерій перевірки адекватності функції регресії полягає в перевірці значимості коефіцієнта множинної кореляції R . Для цього висуваємо гіпотезу $H_0: R^2=0$ про те, що коефіцієнт детермінації R^2 генеральної сукупності, з якої одержана дана вибірка, рівний нулю. Ця гіпотеза рівносильна гіпотезі $H_0: a_0 = a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 0$ про те, що жоден із факторів, включених до регресії, не має суттєвого впливу. Як альтернативу розглянемо гіпотезу $H_1: R^2 \neq 0$ тобто, що хоча б один з коефіцієнтів регресії $a_i \neq 0$. Для перевірки цієї гіпотези використовують статистику:

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-p}{p-1}, \quad (3.17)$$

де n – кількість спостережень, за якими обчислювали значення R ; p – число параметрів регресії.

Для перевірки гіпотези H_0 використовуємо правосторонню критичну область $\Omega [f(\alpha; p-1; n-p), \infty)$, де α – критичне значення порядку розподілу Фішера-Снедекера з $(p-1)$ та $(n-p)$ ступенями вільності.

Тоді правостороння критична область визначається нерівністю $f \geq F_{кр}$, а область прийняття нульової гіпотези – нерівністю $f \leq F_{кр}$. Якщо обчислене значення f статистики більше за її критичне значення, тобто $f \geq F_{кр}$, то тоді нульову гіпотезу H_0 відхиляють та приймають альтернативну гіпотезу H_1 . У цьому випадку коефіцієнт детермінації R^2 суттєво відрізняється від нуля, функція регресії статистично значима та адекватно описує вихідні дані.

Ступінь впливу кожної з ознак, що входить до (3.15) будемо оцінювати на основі перевірки гіпотези про статистичну значимість коефіцієнта рівняння регресії, що відповідає даній ознаці.

Для цього висуваємо гіпотезу $H_0: \alpha_i=0$, про те, що фактор x_i , не має суттєвого впливу на відгук y . Як альтернативу висуваємо гіпотезу $H_1: \alpha_i \neq 0$. Для перевірки даної гіпотези використовують двосторонню область $\Omega: (|T| \geq t(\alpha/2; n-p))$, де $T = t(\alpha/2; n-p)$ – критичне значення порядку $\alpha/2$ розподілу Стюдента з $(n-p)$ ступенями вільності.

Якщо $t_i \leq T_{кр}$, то приймаємо гіпотезу $H_0: a_i=0$, у протилежному випадку вважаємо, що цей коефіцієнт відмінний від нуля.

Враховуючи, що обсяг даних є порівняно великий для визначення коефіцієнтів рівняння регресії застосуємо програму Excel, яка має вбудовані статистичні функції, що дають змогу це зробити швидко [135]. Розрахунки проводимо окремо для оксиду азоту NO, діоксиду азоту NO₂ та вуглекислого газу CO. Тобто одержимо такі числові дані.

Для викидів оксиду азоту NO коефіцієнти регресії: $a_0 = -31,4366$; $a_1 = 0,002755$; $a_2 = 0,025884$; $a_3 = 41,11465$; $a_4 = -0,00263$; коефіцієнт детермінації: $R^2 = 0,654958$; розрахункове значення статистики $F = 22,30379$; число спостережень $n = 52$; число параметрів регресії ступенів вільності знаменника $p = 5$; число ступенів вільності знаменника $p-1 = 4$; число ступенів вільності чисельника $n-p = 47$; середньоквадратичне відхилення нормальної випадкової величини σ_i : $SE_{y_0} = 13,59557$; $SE_{y_1} = 0,001719$; $SE_{y_2} = 0,023546$; $SE_{y_3} = 7,930021$; $SE_{y_4} = 0,003155$; дисперсія σ : $SE_y^2 = 5,972873$; сума квадратів, зумовлена регресією: $SS_{рег.} = 3182,77$; сума квадратів залишків: $SS_{зал.} = 1676,735$.

Рівняння регресії записуємо:

$$C_{NO} = -31,4366 + 0,002755\Pi + 0,025884T_3 + 41,11456\alpha - 0,00263Q. \quad (3.18)$$

Перевіримо на значущість коефіцієнт детермінації R^2 . Задамося рівнем значущості $\alpha = 0,01$. За допомогою таблиць знайдемо критичне значення функції F розподілу з числом ступенів вільності $n-1 = 4$ та $n-p = 47$, тобто будемо мати $F_{кр} = f(0,01;4;47) = 3,51 - \frac{3,51-3,41}{10} \cdot 7 = 3,44$. Одержане розрахункове значення $F = 22,30379$ та порівняємо його з табличним критичним значенням $F_{кр} = f(0,01;5;47) = 3,44 \leq F = 22,30379$, що вказує на те, що коефіцієнт детермінації R^2 значно відрізняється від нуля. Тому гіпотеза $H_0: a_0 = a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 0$ про відсутність регресійної залежності між C_{NO} та

Π , T_3 , α , Q відхиляється як така, що протирічить даним фактичним спостереженням.

Оцінимо значимість вибірових коефіцієнтів регресії a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 . Задано рівнем значущості $\alpha = 0,01$. Обчислимо критичне значення розподілу Стьюдента з $n-p = 47$ ступенів вільності, порядку $\alpha/2 = 0,05$, тобто величину $T_{кр.} = t(0,05;47) = 1,689$. Використовуючи формулу $t = \frac{a_i}{SE_i}$, обчислимо значення статистики для кожного з вибірових коефіцієнтів регресії a_i які наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Значення статистики для викидів оксиду азоту NO

a_i	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
t	-2,31227	1,602328	1,099293	5,184684	-0,83202

Не всі обчислені значення коефіцієнтів, за абсолютною величиною більші за його критичне значення. Для коефіцієнтів a_1 і a_4 ці значення менші, тобто параметри потужність Π та розхід Q газу не мають суттєвого впливу на результуючу ознаку – концентрацію оксиду азоту C_{NO} .

Для викидів діоксиду азоту NO_2 коефіцієнти регресії: $a_0 = -40,276$; $a_1 = 0,002779$; $a_2 = 0,032346$; $a_3 = 21,63776$; $a_4 = -0,00029$; коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,582183$; розрахункове значення статистики $F = 16,37238$; число спостережень $n = 52$; число параметрів регресії ступенів вільності знаменника $p = 5$; число ступенів вільності знаменника $p-1 = 4$; число ступенів вільності чисельника $n-p = 47$; середньоквадратичне відхилення нормальної випадкової величини σ_i : $SE_{y_0} = 10,47344$; $SE_{y_1} = 0,001324$; $SE_{y_2} = 0,018139$; $SE_{y_3} = 6,108945$; $SE_{y_4} = 0,002431$; дисперсія σ : $SE_y^2 = 4,601243$; сума квадратів, зумовлена регресією: $SS_{рег.} = 1386,508$; сума квадратів залишків: $SS_{зал.} = 995,0576$.

Рівняння регресії записуємо:

$$C_{NO_2} = -40,276 + 0,002779\Pi + 0,032346T_3 + 21,63776\alpha - 0,00029Q. \quad (3.19)$$

Перевіримо на значущість коефіцієнт детермінації R^2 . Задамося рівнем значущості $\alpha = 0,01$. За допомогою таблиць знайдемо критичне значення F розподілу з числом ступенів вільності $n-1 = 4$ та $n-p = 47$, тобто матимемо $F_{кр} = f(0,01;4;47) = 3,51 - \frac{3,51 - 3,41}{10} \cdot 7 = 3,44$. Одержане розрахункове значення $F = 16,37238$. Порівняємо його з табличним критичним значенням $F_{кр} = f(0,01;5;47) = 3,44 \leq F = 16,37238$, що вказує на те, що коефіцієнт детермінації R^2 значно відрізняється від нуля. Тому гіпотезу $H_0: \alpha_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0$ про відсутність регресійної залежності між змінними C_{NO_2} та Π , T_3 , α , Q і відхиляємо як таку, що протирічить даним фактичним спостереженням.

Оцінимо значимість вибірових коефіцієнтів регресії $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$. Задамося рівнем значущості $\alpha = 0,01$. Обчислимо критичне значення розподілу Стьюдента з $n-p = 47$ ступенів вільності, порядку $a/2 = 0,05$, тобто величину $T_{кр} = t(0,05;47) = 1,689$. Використовуючи формулу $t = \frac{a_i}{SE_i}$, обчислимо значення статистики для кожного з вибірових коефіцієнтів регресії a_i , поданих у табл. 3.6.

Таблиця 3.6

Значення статистики для викидів діоксиду азоту NO_2

a_i	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4
t	-0,12115	3,54198	1,783265	2,098521	-3,84554

Не всі обчислені значення коефіцієнтів за абсолютною величиною більші від його критичного значення. Для коефіцієнтів α_2 і α_4 ці значення менші, тому такі показники як температура T_3 продуктів згоряння та витрата Q газу не

мають суттєвого впливу на результуючу ознаку, якою є концентрація C_{NO_2} викидів діоксиду азоту.

Для викидів оксиду вуглецю газу CO коефіцієнти регресії: $\alpha_0 = 871,9206$; $\alpha_1 = -0,01665$; $\alpha_2 = -0,09184$; $\alpha_3 = -384,339$; $\alpha_4 = 0,00443$; коефіцієнт детермінації: $R^2 = 0,520561$; розрахункове значення статистики $F = 12,7578$; число спостережень $n = 52$; число параметрів регресії ступенів вільності знаменника $p = 5$; число ступенів вільності знаменника $p-1 = 4$; число ступенів вільності чисельника $n-p = 47$; середньоквадратичне відхилення нормальної випадкової величини σ_i : $SE_{y_0} = 150,9657$; $SE_{y_1} = 0,019091$; $SE_{y_2} = 0,261457$; $SE_{y_3} = 88,05523$; $SE_{y_4} = 0,035036$; дисперсія σ : $SE_y^2 = 66,323$; сума квадратів, зумовлена регресією: $SS_{\text{рег.}} = 224473,1$; сума квадратів залишків: $SS_{\text{зал.}} = 206740,8$.

Рівняння регресії записуємо:

$$C_{CO} = 871,9206 - 0,01665\Pi - 0,09184T_3 - 384,339\alpha + 0,00443Q. \quad (3.20)$$

Перевіримо на значущість коефіцієнт детермінації R^2 . Задамося рівнем значущості $\alpha = 0,01$. За допомогою таблиць знайдемо критичне значення F розподілу з числом ступенів вільності $n-1 = 4$ та $n-p = 47$, тобто матимемо $F_{\text{кр}} = f(0,01;4;47) = 3,51 - \frac{3,51 - 3,41}{10} \cdot 7 = 3,44$. Одержане розрахункове значення $F = 12,7578$. Порівняємо його з табличним критичним значенням $F_{\text{кр}} = f(0,01;5;47) = 3,44 \leq F = 12,7578$, що вказує на те, що коефіцієнт детермінації R^2 значно відрізняється від нуля. Тому гіпотезу $H_0: \alpha_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0$ про відсутність регресійної залежності між змінними C_{NO_2} та Π , T_3 , α , Q відхиляємо як таку, що протирічить даним фактичним спостереженням.

Оцінимо значимість вибірових коефіцієнтів регресії α_0 , α_1 , α_2 , α_3 , α_4 . Задамося рівнем значущості $\alpha = 0,01$. Обчислимо критичне значення розподілу Стюдента з $n-p = 47$ ступенів вільності, порядку $\frac{\alpha}{2} = 0,05$, тобто величину

$T_{кр.} = t(0,05;47) = 1,689$. Використовуючи формулу $t = \frac{a_i}{SE_i}$, обчислимо значення

статистики для кожного з вибірових коефіцієнтів регресії α_i (табл. 3.7).

Таблиця 3.7

Значення статистики для викидів оксиду вуглецю CO

α_i	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4
t	5,775622	-0,87197	-0,35128	-4,36474	0,126451

Не всі обчислені значення коефіцієнтів, за абсолютною величиною більші від його критичного значення. Для коефіцієнтів α_1 , α_2 і α_4 ці значення менші, тому потужність П, температура T_3 продуктів згоряння та витрати Q газу не мають суттєвого впливу на результуючу ознаку, якою є концентрація C_{CO} викидів оксиду вуглецю.

Однак, на підставі порівняння коефіцієнтів регресії не можна встановити, яка з факторних ознак найбільше впливає на результативну, оскільки коефіцієнти регресії між собою не порівнювані, адже їх виражено різними одиницями. З метою виявлення порівнювальної сили впливу окремих факторів та їхніх резервів, статистика обчислює часткові коефіцієнти еластичності ε_i , а також β_i коефіцієнти за формулами:

$$\varepsilon_i = a_i \cdot \frac{\bar{X}_i}{\bar{Y}_i}; \quad \beta_i = a_i \cdot \frac{\sigma_{xi}}{\sigma_y}, \quad (3.21)$$

де α_i – коефіцієнт регресії при і-му факторі; \bar{X}_i – середнє значення і-го фактора; \bar{Y}_i – середнє значення результативної ознаки; σ_{xi} – середнє квадратичне відхилення і-го фактора; σ_y – середнє квадратичне відхилення результативної ознаки.

Часткові коефіцієнти еластичності показують, на скільки відсотків зміниться результативна ознака при зміні на 1 % кожного фактора та фіксованому значенні інших факторів.

Для визначення факторів, які мають найбільші резерви поліпшення досліджуваної ознаки, з урахуванням ступеня варіації факторів, закладених у рівняння множинної регресії, обчислюють β – коефіцієнти, які показують, на яку частину середнього квадратичного відхилення змінюється результативна ознака при зміні відповідної факторної ознаки на значення її середнього квадратичного відхилення.

Обчислені часткові коефіцієнти ε та β , які отримані на основі одержаних експериментальних даних відповідно для всіх викидних газів.

Для оксиду азоту розрахункові значення коефіцієнтів ε такі:

$$\varepsilon_1 = a_1 \cdot \frac{\bar{X}_1}{Y} = 0,002755 \cdot \frac{7175,846}{51,7596} = 0,381921;$$

$$\varepsilon_2 = a_2 \cdot \frac{\bar{X}_2}{Y} = 0,025884 \cdot \frac{684,8596}{51,7596} = 0,342486;$$

$$\varepsilon_3 = a_3 \cdot \frac{\bar{X}_3}{Y} = 41,11465 \cdot \frac{1,278189}{51,7596} = 1,015314;$$

$$\varepsilon_4 = a_4 \cdot \frac{\bar{X}_4}{Y} = -0,00263 \cdot \frac{2609,73}{51,7596} = -0,13236$$

На основі аналізу часткових коефіцієнтів ε еластичності встановлено, що за абсолютним приростом найбільший вплив на зростання концентрації C_{NO} викидів оксидів азоту має коефіцієнт α надлишку повітря, зі збільшенням якого на 1 % концентрація C_{NO} зростає на 1,02 %, а відповідно при зростанні на 1 % температури T_3 продуктів згорання концентрація C_{NO} зменшується на

0,342 %, при збільшенні потужності P на 1 % - зростає на 0,382 %, і відповідно при зростанні витрати Q газу на 1 % – зменшується на 0,132 %.

Для діоксиду азоту розрахункові значення коефіцієнтів ε такі:

$$\varepsilon_1 = a_1 \cdot \frac{\bar{X}_1}{Y} = 0,002779 \cdot \frac{7175,846}{28,7096} = 0,695;$$

$$\varepsilon_2 = a_2 \cdot \frac{\bar{X}_2}{Y} = 0,032346 \cdot \frac{684,8596}{28,7096} = 0,771615;$$

$$\varepsilon_3 = a_3 \cdot \frac{\bar{X}_3}{Y} = 21,63776 \cdot \frac{1,278189}{28,7096} = 0,96334;$$

$$\varepsilon_4 = a_4 \cdot \frac{\bar{X}_4}{Y} = -0,00029 \cdot \frac{2609,73}{28,7096} = -0,02677.$$

На основі аналізу одержаних коефіцієнтів встановлено, що за абсолютним приростом найбільший вплив на зростання концентрації C_{NO_2} викидів діоксиду азоту має коефіцієнт α надлишку повітря, зі збільшенням якого на 1 % концентрація C_{NO_2} зростає на 0,96 %, а відповідно зі зростанням на 1 % температури T_3 продуктів згорання концентрація C_{NO_2} збільшується на 0,772 %, зі збільшенням потужності P на 1 % – зростає на 0,69 %, і відповідно зі зростанням витрати Q газу – зменшується на 0,027 %.

Для оксиду вуглецю розрахункові значення коефіцієнтів ε такі:

$$\varepsilon_1 = a_1 \cdot \frac{\bar{X}_1}{Y} = -0,01665 \cdot \frac{7175,846}{209,873} = -0,569;$$

$$\varepsilon_2 = a_2 \cdot \frac{\bar{X}_2}{Y} = -0,09184 \cdot \frac{684,8596}{209,873} = -0,29971;$$

$$\varepsilon_3 = a_3 \cdot \frac{\bar{X}_3}{Y} = -384,339 \cdot \frac{1,278}{209,873} = -2,34073;$$

$$\varepsilon_4 = a_4 \cdot \frac{\bar{X}_4}{Y} = 0,00443 \cdot \frac{2609,73}{209,873} = 0,05509.$$

На основі аналізу одержаних коефіцієнтів ε встановлено, що за абсолютним приростом найбільший вплив на зростання концентрації C_{CO} викидів оксиду вуглецю має коефіцієнт α надлишку повітря, зі збільшенням якого на 1 % концентрація C_{CO} зменшується на 2,34073 %, а відповідно зі зростанням на 1 % температури T_3 продуктів згорання вона зменшується на 0,2997 %, а зі збільшенням потужності P на 1 % – спадає на 0,569 %, і відповідно зі зростанням витрати Q газу – збільшується на 0,055 %.

Нижче подано значення обчислень коефіцієнтів β :

– для викидів оксиду азоту:

$$\beta_1 = a_1 \cdot \frac{\sigma_{x1}}{\sigma_y} = 0,002755 \cdot \frac{0,0021719}{5,972873} = 0,0008;$$

$$\beta_2 = a_2 \cdot \frac{\sigma_{x2}}{\sigma_y} = 0,025884 \cdot \frac{0,023465}{5,972873} = 0,0001;$$

$$\beta_3 = a_3 \cdot \frac{\sigma_{x3}}{\sigma_y} = 41,11465 \cdot \frac{7,930021}{5,972873} = 54,587;$$

$$\beta_4 = a_4 \cdot \frac{\sigma_{x4}}{\sigma_y} = -0,00263 \cdot \frac{0,003155}{5,972873} = -0,0000014$$

– для викидів діоксиду азоту:

$$\beta_1 = a_1 \cdot \frac{\sigma_{x1}}{\sigma_y} = 0,002779 \cdot \frac{0,001324}{4,601243} = 0,0000008;$$

$$\beta_2 = a_2 \cdot \frac{\sigma_{x2}}{\sigma_y} = 0,032346 \cdot \frac{0,018139}{4,601243} = 0,000128;$$

$$\beta_3 = a_3 \cdot \frac{\sigma_{x3}}{\sigma_y} = 21,63776 \cdot \frac{6,108945}{4,601243} = 28,727;$$

$$\beta_4 = a_4 \cdot \frac{\sigma_{x4}}{\sigma_y} = -0,00029 \cdot \frac{0,002431}{4,601243} = -0,00000016 ;$$

– для викидів оксиду вуглецю:

$$\beta_1 = a_1 \cdot \frac{\sigma_{x1}}{\sigma_y} = -0,01665 \cdot \frac{0,019091}{66,323} = -0,00000479;$$

$$\beta_2 = a_2 \cdot \frac{\sigma_{x2}}{\sigma_y} = -0,09184 \cdot \frac{0,261457}{66,323} = -0,00036;$$

$$\beta_3 = a_3 \cdot \frac{\sigma_{x3}}{\sigma_y} = -384,339 \cdot \frac{88,05523}{66,323} = -510,276;$$

$$\beta_4 = a_4 \cdot \frac{\sigma_{x4}}{\sigma_y} = 0,00443 \cdot \frac{0,035036}{66,323} = 0,00000234$$

Аналіз коефіцієнтів β показує, що на концентрації викидів оксиду азоту, діоксиду азоту та оксиду вуглецю найбільший вплив має коефіцієнт надлишку повітря.

Отже, отримані вище аналітичні залежності (3.1-3.12) та (3.12-3.20) характеризують утворення шкідливих викидів продуктів згорання газу в камерах згорання, їх кількісну оцінку і дають можливість обґрунтувати і мінімізувати викиди шкідливих речовин в атмосферу, розробити програми покращення екологічної ситуації на територіях.

Висновки до розділу

1. Проведено комплексне екологічне обстеження характеристик викидів газотурбінних перекачувальних агрегатів, що дозволило визначити параметри, що здатні впливати на склад та якість викидних газів.

2. При отриманні нових часткових й узагальнених багатофакторних залежностей зміни концентрацій викидних газів NO, NO₂, CO при зміні

коефіцієнта надлишку повітря, температури згорання, витрати газу і потужності газотурбінної установки ГТК-10І, встановлено, що:

– з ростом коефіцієнта надлишку повітря концентрація викидних газів, оксиду і діоксиду азоту зростає, а оксиду вуглецю зменшується;

– з ростом температури згорання концентрація викидних газів оксиду і діоксиду азоту зростає, а оксиду вуглецю зменшується;

– з ростом витрати Q газу і потужності P газотурбінного двигуна концентрації викидних газів оксиду азоту та оксиду вуглецю змінюються не значно, а концентрації діоксиду азоту зростають.

3. Встановлено, що за абсолютним приростом найбільший вплив на зростання концентрації оксидів азоту та оксиду вуглецю має коефіцієнт надлишку повітря, зі збільшенням якого на 1 % концентрація C_{NO} зростає на 1,02 %, концентрація C_{NO_2} зростає на 0,96 %, а концентрація C_{CO} зменшується на 2,34073 %.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ ЗАХОДІВ ТА СПОСОБІВ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН ГАЗОПЕКАЧУВАЛЬНИМИ АГРЕГАТАМИ

Компресорні станції щорічно викидають в атмосферу тисячі тонн забруднювальних речовин, які мають негативний вплив на навколишнє середовище. Удосконалення і застосування технологій утилізації викидних газів дозволить зекономити вуглеводневі енергоресурси, звести до мінімуму збитки від забруднення довкілля та шкідливого впливу на людей, що в сьгоднішніх умовах прогресуючого антропогенного навантаження на навколишнє середовище набуває все більшого значення.

Основними речовинами, викидуваними в атмосферу, є продукти повного згорання газу оксиди азоту і вуглецю, а також речовини, які утворюються в результаті проходження високотемпературних процесів і хімічних реакцій. Зі збільшенням концентрації вуглекислого газу в атмосферному повітрі підсилюється дія парникового ефекту, що призводить до зростання, середньорічної температури планети.

Нижче зазначено запропоновані технічні та технологічні рішення, спрямовані на зменшення впливу викидних газів оксидів азоту та оксиду вуглецю і пов'язані безпосередньо з основними технологічними процесами – транспортуванням газу через мережу магістральних газопроводів.

4.1 Дослідження впливу на довкілля параметрів спалювання газу газоперекачувального агрегату

У результаті статистичної обробки фактичних даних встановлено, що найбільш значний вплив на концентрацію забруднювальних речовин у викидах газоперекачувального агрегату має коефіцієнт надлишку повітря. Тому для

визначення параметрів досягнення мінімальних значень концентрацій забруднювальних речовин у викидах ГПА ми побудували залежність концентрацій викидів забруднювальних речовин від коефіцієнта надлишку повітря (рис. 4.1). Оскільки концентрації речовин набувають значень різного порядку, залежність будували у координатах умовних величин, які визначали шляхом ділення кожного із значень на найбільше значення ряду.

За результатами проведених досліджень викидів оксиду вуглецю та оксидів азоту ми встановили, що для регулювання робочого режиму роботи ГПА шляхом зміни коефіцієнта надлишку повітря в середньому можна знизити концентрації оксиду азоту C_{NO} – на 21 %, діоксиду азоту C_{NO_2} – на 22 %, оксиду вуглецю C_{CO} – на 37 %, при цьому слід зазначити, що зниження концентрацій оксидів азоту та вуглецю відбувається обернено пропорційно одне до одного.

У зв'язку з цим виникає необхідність встановити ступінь зменшення реального впливу викидів на довкілля у місцях розташування КС залежно від величини коефіцієнта надлишку повітря. Такі дослідження ми проводили для компресорної станції Богородчанського лінійного-виробничого управління магістральних газопроводів. Розрахунок та дослідження розсіювання забруднювальних речовин проводили за допомогою програмного комплексу Еол-Плюс, версія 5.23.

Вихідними даними для розрахунку приземних концентрацій забруднювальних речовин є:

- 1) параметри джерел викидів забруднювальних речовин;
- 2) кліматологічна характеристика;
- 3) фонові концентрації забруднювальних речовин для розрахунку забруднення атмосфери.

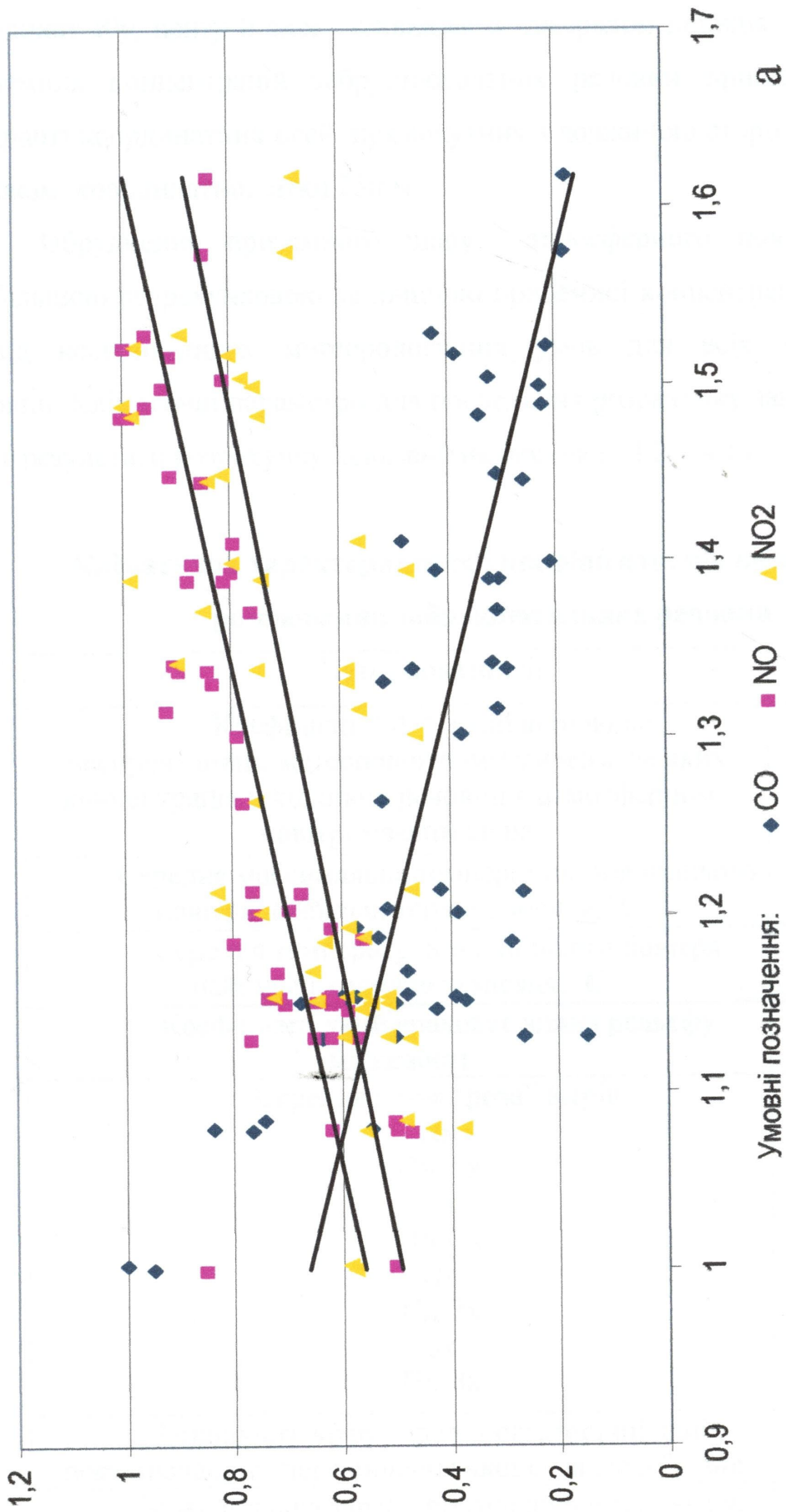


Рис. 4.1. Залежність концентрацій викидів забруднювальних речовин від коефіцієнта α надлишку повітря

Для розрахунку забруднення атмосфери прийнято прямокутну систему координат xOy , центр O якої співпадає з джерелом викидів. Для розрахунку приземних концентрацій забруднювальних речовин прийнято в першому квадранті координатних осей прямокутник з довжиною сторін 5000 м x 5000 м з кроком координатної сітки 250 м.

Забруднення приземного шару атмосферного повітря оцінено за найбільшою розрахунковою величиною приземної концентрації на межі СЗЗ в період несприятливих метеорологічних умов для всіх забруднювальних речовин. Кліматичні параметри для проведення розрахунку зазначено у таблиці 4.1, а результати розрахунку показано на рисунках 4.2 – 4.13.

Таблиця 4.1

Кліматична характеристика і коефіцієнти, що визначають умови розсіювання забруднювальних речовин

Назва показників	Величина
Коефіцієнт “ А “, який відповідає несприятливим метеорологічним умовам, за яких концентрація шкідливих речовин в атмосферному повітрі максимальна	200
Середня максимальна температура зовнішнього повітря найбільш теплого місяця, °С	+ 24,3
Середня температура зовнішнього повітря найбільш холодного місяця, °С	- 4,2
Коефіцієнт, який враховує вплив рельєфу місцевості	1
Середня річна “роза” вітрів	
Пн	10,7
Пн-Сх	9,7
Сх	16,0
Пд-Сх	9,4
Пд	11,8
Пд-Зх	12,1
Зх	16,9
Пн-Зх	13,4
Швидкість вітру/середні багаторічні дані/, повторюваність перевищення якої складає 5 %, м/с	10-11
Максимальна зареєстрована швидкість вітру, м/с	28

Алсту Діксон, Розрахунок виконано 14.03.2016 о 16:38 програмою Еол-Плюс, версія 5.23
2500.0

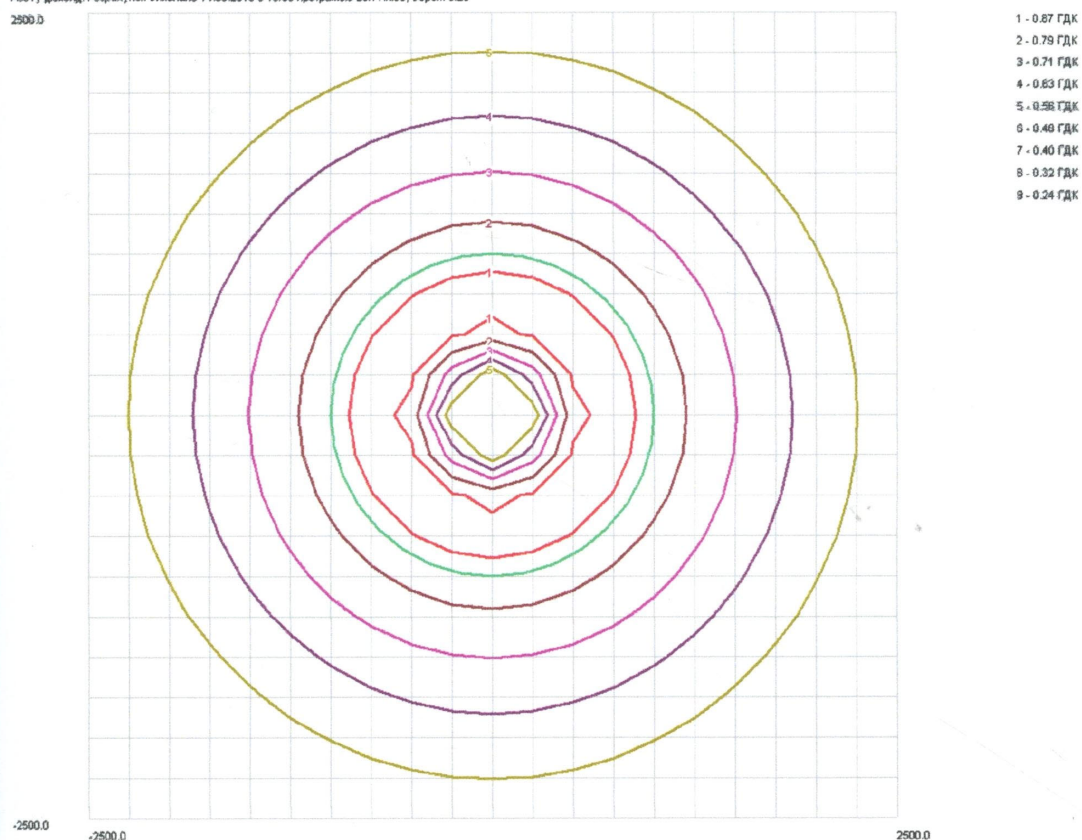


Рис. 4.2. Розрахункові дані розсіювання діоксиду азоту по радіусу від джерела викидів за коефіцієнта $\alpha = 1,0$ надлишку повітря

Як видно із рисунка 4.2, основні параметри розсіювання діоксиду азоту за коефіцієнта надлишку повітря 1,0 становлять:

- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони максимальньо 0,87 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони мінімально 0,56 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації за межами санітарно-захисної зони максимальньо 0,7 9ГДК;
- перевищень гранично допустимої концентрації не спостерігається на всій площі розсіювання, як у межах, так і за межами санітарно-захисної зони.

Азоту діоксид. Розрахунок виконано 14.03.2016 о 15:34 програмою Еол-Плюс, версія 5.23
2500.0

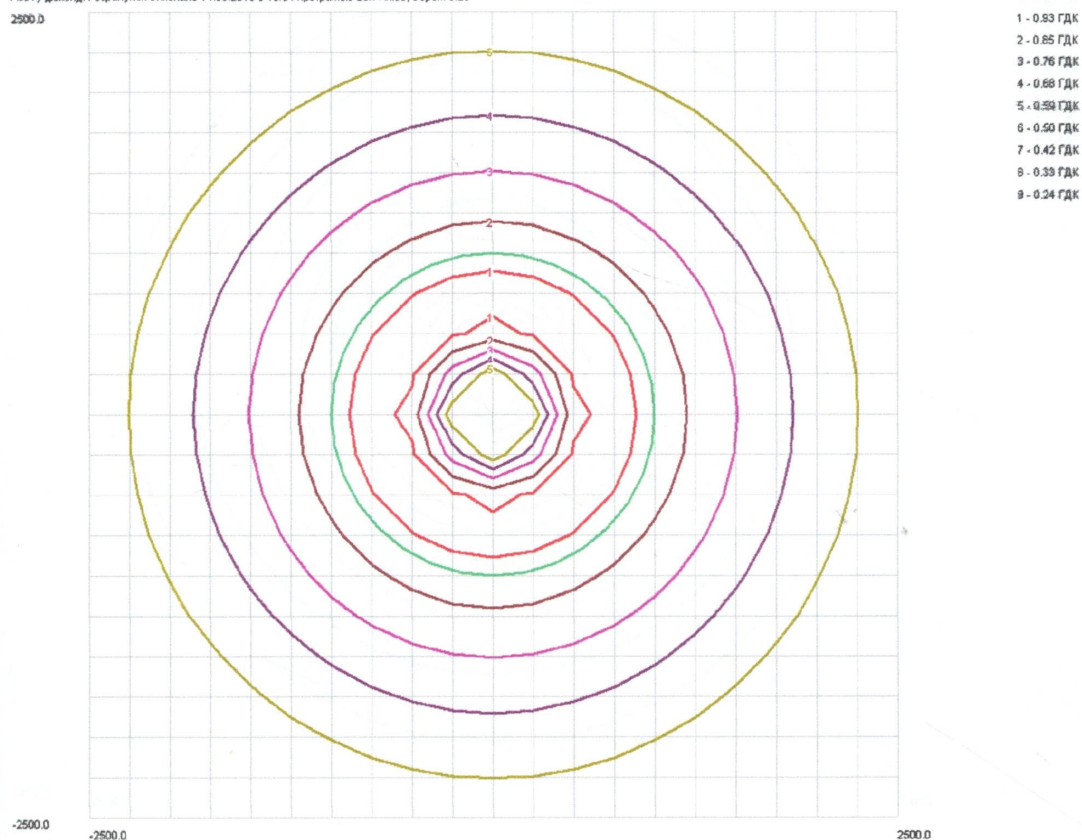


Рис. 4.3. Розрахункові дані розсіювання діоксиду азоту по радіусу від джерела викидів за коефіцієнта $\alpha = 1,1$ надлишку повітря

Як видно із рисунка 4.3, основні параметри розсіювання діоксиду азоту за коефіцієнта надлишку повітря 1,1 становлять:

- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони максимальньо 0,93 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони мінімально 0,59 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації за межами санітарно-захисної зони максимальньо 0,85 ГДК;
- перевищень гранично допустимої концентрації не спостерігається на всій площі розсіювання, як у межах, так і за межами санітарно-захисної зони.

Аэроу діоксид. Розрахунок виконано 14.03.2016 о 15:41 програмою Еол-Плюс, версія 5.23
2500.0



1 - 1.16 ГДК
2 - 1.05 ГДК
3 - 0.93 ГДК
4 - 0.82 ГДК
5 - 0.71 ГДК
6 - 0.59 ГДК
7 - 0.46 ГДК
8 - 0.37 ГДК
9 - 0.26 ГДК

Рис. 4.4. Розрахункові дані розсіювання діоксиду азоту по радіусу від джерела викидів за коефіцієнта $\alpha = 1,3$ надлишку повітря

Як видно із рисунка 4.4, основні параметри розсіювання діоксиду азоту за коефіцієнта надлишку повітря 1,3 становлять:

- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони максимально 1,16 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони мінімально 0,71 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично-допустимої концентрації за межами санітарно-захисної зони максимально 1,05 ГДК;
- перевищення гранично допустимої концентрації спостерігаються як у межах, так і за межами санітарно-захисної зони. На відстані 1240 м від джерела забруднення фактичні концентрації діоксиду азоту дорівнюють гранично допустимій концентрації. Ця відстань перевищує розмір нормативної санітарно-захисної зони на 240 м.

У випадку, якщо на площі розсіювання спостерігаються концентрації забруднювальних речовин, що перевищують гранично допустиму концентрацію, проводять коригування санітарно-захисної зони з урахуванням рози вітрів. Відповідно до п. 8.6.2 ОНД-86 [137] розмір санітарно-захисної зони коригують з урахуванням рози вітрів території за формулою:

$$L = L_0 \cdot \frac{P}{P_0}, \quad (4.1)$$

де: L – розрахунковий розмір СЗЗ; L_0 – розмір ділянки місцевості у даному напрямку, де концентрація забруднювальних речовин перевищує ГДК (відповідно до проведених розрахунків максимальна відстань від джерела забруднення, на якій фактичні концентрації діоксиду азоту перевищують гранично-допустиму концентрацію, становить $L_0 = 1240$ м); P – максимальна середньомісячна повторюваність напрямку вітру даного румбу протягом року; P_0 – повторюваність напрямку вітру одного румбу (за 8-румбової рози вітрів – $P_0 = 100/8 = 12,5$ %).

Розрахунок коригованого розміру СЗЗ наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Результати визначення коригованого розміру санітарно-захисної зони для діоксиду азоту за коефіцієнта $\alpha = 1,3$ надлишку повітря

Максимальна середньомісячна повторюваність напрямку вітру даного румбу протягом року		$\frac{P}{P_0}$	Коригована СЗЗ, м
Напрямок	Повторюваність від джерела, %		
Північ	10,7	0,856	1061,44
Північний схід	9,7	0,776	962,24
Схід	16,0	1,28	1587,2
Південний схід	9,4	0,752	932,48
Південь	11,8	0,944	1170,56

Максимальна середньомісячна повторюваність напрямку вітру даного румбу протягом року		$\frac{P}{P_0}$	Коригована СЗЗ, м
Напрямок	Повторюваність від джерела, %		
Південний захід	12,1	0,968	1200,32
Захід	16,9	1,352	1676,48
Північний захід	13,4	1,072	1329,28

Алгоритм розрахунку виконано 14.03.2018 о 15:44 програмою Еол-Плюс, версія 5.23
2500.0



Рис. 4.5. Розрахункові дані розсіювання діоксиду азоту по радіусу від джерела викидів за коефіцієнта $\alpha = 1,6$ надлишку повітря

Як видно із рисунка 4.5, основні параметри розсіювання діоксиду азоту за коефіцієнта надлишку повітря 1,6 становлять:

– відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони максимального 1,41 ГДК;

– відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони мінімально 0,64 ГДК;

– відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації за межами санітарно-захисної зони максимальньо 1,27 ГДК;

– перевищення гранично допустимої концентрації спостерігаються як у межах, так і за межами санітарно-захисної зони. На відстані 1580 м від джерела забруднення фактичні концентрації діоксиду азоту дорівнюють гранично допустимій концентрації. Ця відстань перевищує розмір нормативної санітарно-захисної зони на 580 м.

У випадку, якщо на площі розсіювання спостерігаються концентрації забруднювальних речовин, що перевищують гранично-допустиму концентрацію, проводять коригування санітарно-захисної зони з урахуванням рози вітрів. Розраховані розміри коригованої санітарно-захисної зони згідно з формулою (4.1) зазначено у таблиці 4.3 ($L_0 = 1580$ м).

Таблиця 4.3

Результати визначення коригованого розміру санітарно- захисної зони для діоксиду азоту за коефіцієнта $\alpha = 1,6$ надлишку повітря

Максимальна середньомісячна повторюваність напрямку вітру даного румбу протягом року		$\frac{P}{P_0}$	Коригована СЗЗ, м
Напрямок	Повторюваність від джерела, %		
Північ	10,7	0,856	1352,48
Північний схід	9,7	0,776	1226,08
Схід	16,0	1,28	2022,4
Південний схід	9,4	0,752	1188,16
Південь	11,8	0,944	1491,52
Південний захід	12,1	0,968	1529,44
Захід	16,9	1,352	2136,16
Північний захід	13,4	1,072	1693,76

Азоту оксид, Розрахунок виконано 14.03.2016 о 15:38 програмою Еол-Плюс, версія 5.23
2500.0



Рис. 4.6. Розрахункові дані розсіювання оксиду азоту по радіусу від джерела викидів за коефіцієнта $\alpha = 1,0$ надлишку повітря

Як видно із рисунка 4.6, основні параметри розсіювання оксиду азоту за коефіцієнта надлишку повітря 1,0 становлять:

- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони максимально 0,81 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони мінімально 0,52 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації за межами санітарно-захисної зони максимально 0,74 ГДК;
- перевищень гранично-допустимої концентрації не спостерігається на всій площі розсіювання, як у межах, так і за межами санітарно-захисної зони.



Рис. 4.7. Розрахункові дані розсіювання оксиду азоту по радіусу від джерела викидів за коефіцієнта $\alpha = 1,1$ надлишку повітря

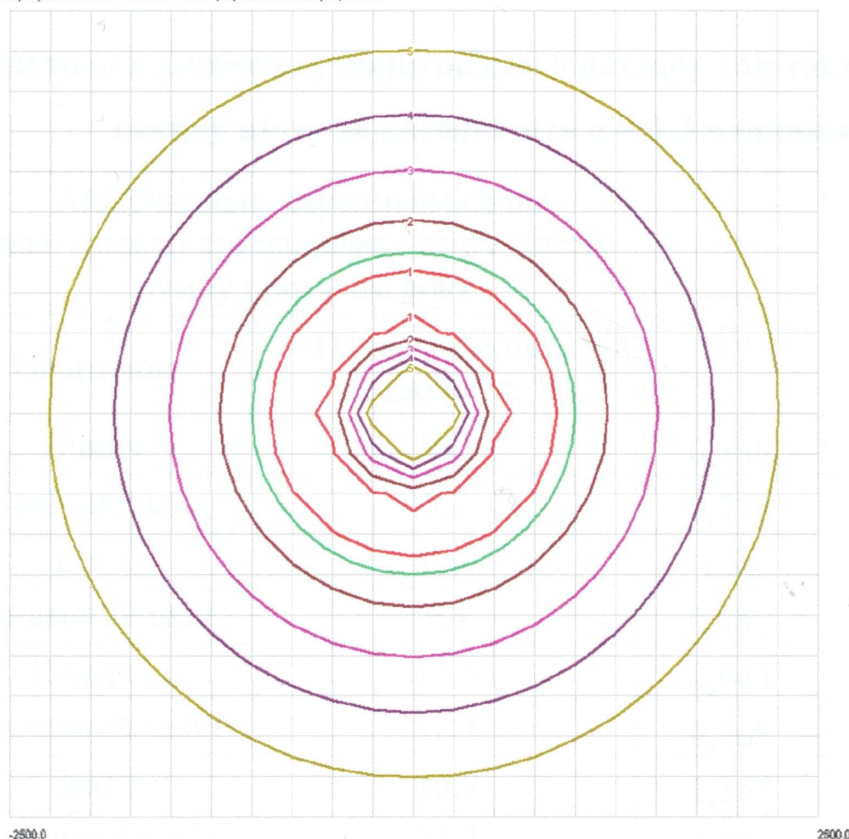
Як видно із рисунка 4.7, основні параметри розсіювання оксиду азоту за коефіцієнта надлишку повітря 1,1 становлять:

- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони максимально 0,89 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони мінімально 0,52 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації за межами санітарно-захисної зони максимально 0,74 ГДК;
- перевищень гранично допустимої концентрації не спостерігається на всій площі розсіювання, як у межах, так і за межами санітарно-захисної зони. Виходячи з цього коригування санітарно-захисної зони не розраховують.

Азоту оксид. Розрахунок виконано 14.03.2016 о 15:41 програмою Еол-Плюс, версія 5.23

2800.0

-2800.0



1 - 1.06 ГДК
2 - 0.96 ГДК
3 - 0.86 ГДК
4 - 0.76 ГДК
5 - 0.66 ГДК
6 - 0.56 ГДК
7 - 0.45 ГДК
8 - 0.36 ГДК
9 - 0.26 ГДК

Рис. 4.8. Розрахункові дані розсіювання оксиду азоту по радіусу від джерела викидів за коефіцієнта $\alpha = 1,3$ надлишку повітря

Як видно із рисунка 4.8, основні параметри розсіювання оксиду азоту за коефіцієнта надлишку повітря 1,3 становлять:

- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони максимально 1,06 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони мінімально 0,66 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації за межами санітарно-захисної зони максимально 0,96 ГДК;
- перевищення гранично допустимої концентрації спостерігаються в межах санітарно-захисної зони на відстані 875 м від джерела забруднення, за межами санітарно-захисної зони таких значень немає.

Розраховані розміри коригованої санітарно-захисної зони згідно з формулою (4.1) зазначено у таблиці 4.4 ($L_0 = 875$ м).

Результати визначення коригованого розміру санітарно-захисної зони для оксиду азоту за коефіцієнта $\alpha = 1,3$ надлишку повітря

Максимальна середньомісячна повторюваність напрямку вітру даного румбу протягом року		$\frac{P}{P_0}$	Коригована СЗЗ, м
Напрямок	Повторюваність від джерела, %		
Північ	10,7	0,856	749
Північний схід	9,7	0,776	679
Схід	16,0	1,28	1120
Південний схід	9,4	0,752	658
Південь	11,8	0,944	826
Південний захід	12,1	0,968	847
Захід	16,9	1,352	1183
Північний захід	13,4	1,072	938

Астуту оксид, Розрахунок виконано 14.03.2016 о 16:44 програмою Еко-Плюс, версія 5.23
2500.0

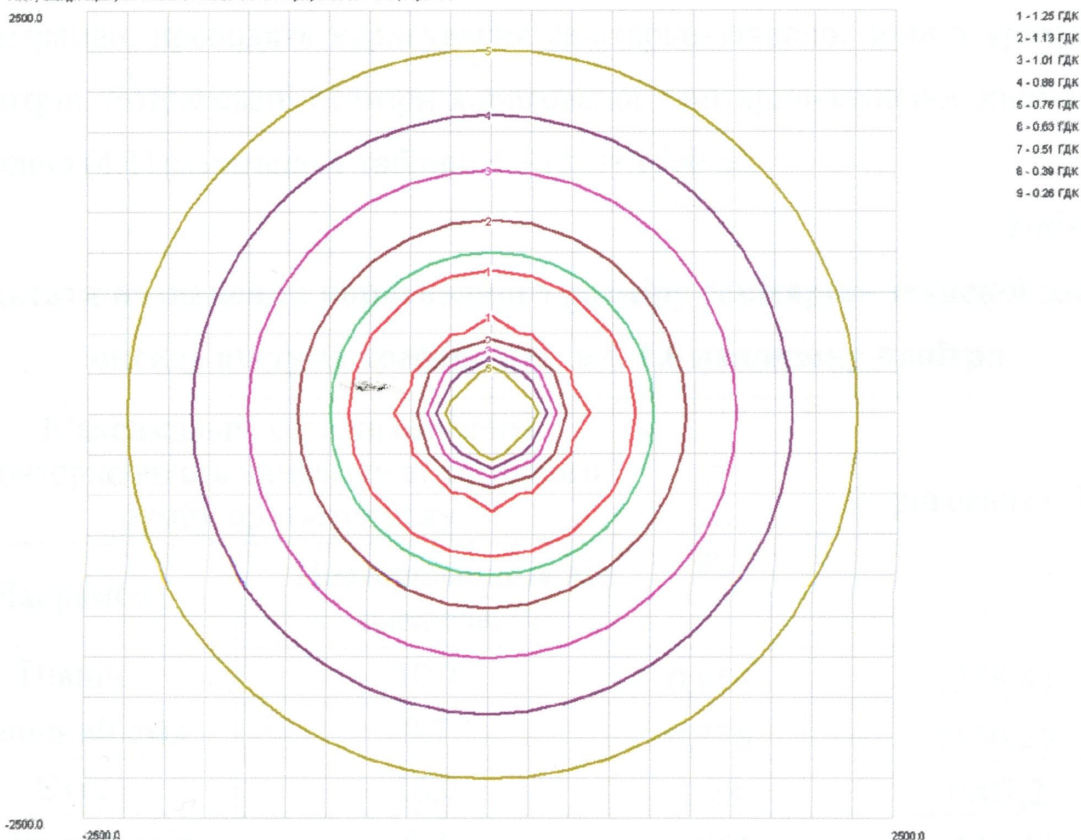


Рис. 4.9. Розрахункові дані розсіювання оксиду азоту по радіусу від джерела викидів за коефіцієнта $\alpha = 1,6$ надлишку повітря

Як видно із рисунка 4.9, основні параметри розсіювання оксиду азоту за коефіцієнта надлишку повітря 1,6 становлять:

- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони максимально 1,25 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони мінімально 0,76 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації за межами санітарно-захисної зони максимально 1,13 ГДК;
- перевищення гранично допустимої концентрації спостерігаються як у межах, так і за межами санітарно-захисної зони. На відстані 1490 м від джерела забруднення фактичні концентрації діоксиду азоту дорівнюють гранично-допустимій концентрації. Ця відстань перевищує розмір нормативної санітарно-захисної зони на 490 м.

У випадку, якщо на площі розсіювання спостерігаються концентрації забруднювальних речовин, що перевищують гранично допустиму концентрацію, проводять коригування санітарно-захисної зони з урахуванням рози вітрів. Розраховані розміри коригованої санітарно-захисної зони згідно з формулою (4.1) зазначено у таблиці 4.5 ($L_0 = 1490$ м).

Таблиця 4.5

Результати визначення коригованого розміру санітарно- захисної зони для оксиду азоту за коефіцієнта $\alpha = 1,6$ надлишку повітря

Максимальна середньомісячна повторюваність напрямку вітру даного румбу протягом року		$\frac{P}{P_0}$	Коригована СЗЗ, м
Напрямок	Повторюваність від джерела, %		
Північ	10,7	0,856	1275,44
Північний схід	9,7	0,776	1156,24
Схід	16,0	1,28	1907,2
Південний схід	9,4	0,752	1120,48
Південь	11,8	0,944	1406,56

Продовження таблиці 4.5

Максимальна середньомісячна повторюваність напрямку вітру даного румбу протягом року		$\frac{P}{P_0}$	Коригована СЗЗ, м
Напрямок	Повторюваність від джерела, %		
Південний захід	12,1	0,968	1442,32
Захід	16,9	1,352	2014,48
Північний захід	13,4	1,072	1597,28

Вулкани оновл. Розрахунок виконано 14.03.2016 о 15:34 програмою Eon-Fluor, версія 5.23
2500.0

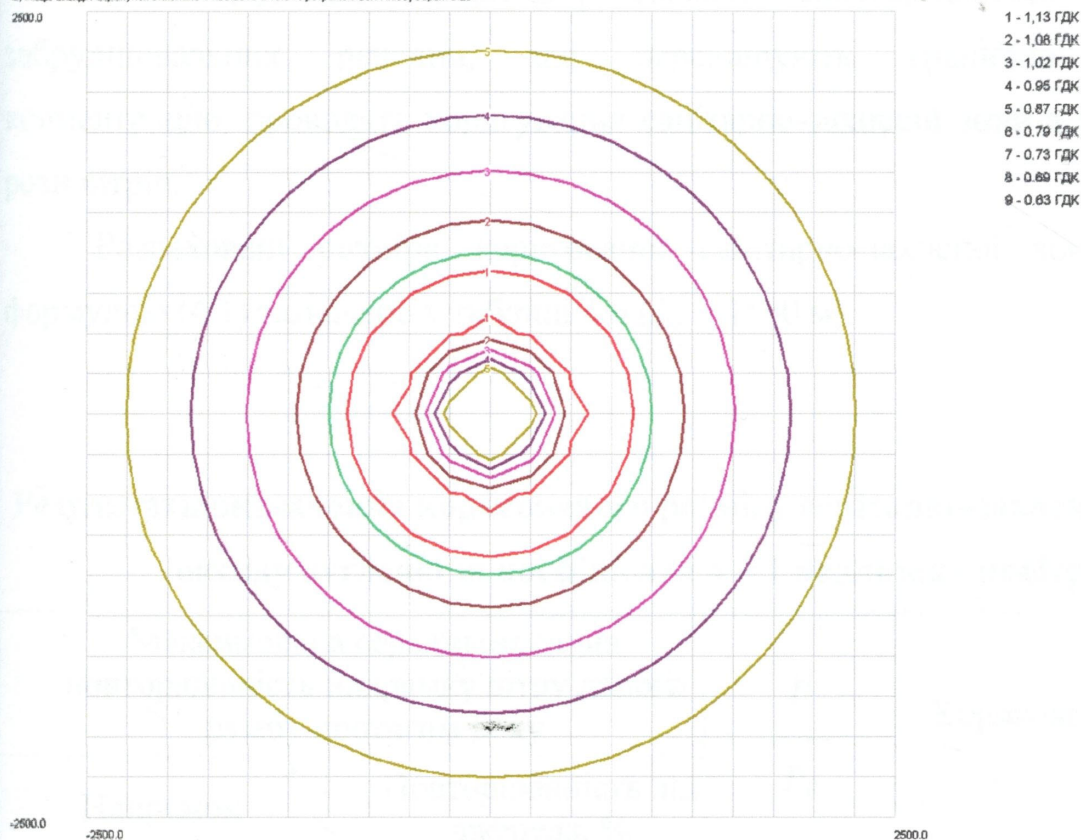


Рис. 4.10. Розрахункові дані розсіювання оксиду вуглецю по радіусу від джерела викидів за коефіцієнта $\alpha = 1,0$ надлишку повітря

Як видно із рисунка 4.10, основні параметри розсіювання оксиду азоту за коефіцієнта надлишку повітря 1,0 становлять:

– відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони максимально 1,13 ГДК;

- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони мінімально 0,87 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації за межами санітарно-захисної зони максимально 1,08 ГДК;
- перевищення гранично допустимої концентрації спостерігаються як у межах, так і за межами санітарно-захисної зони. На відстані 1560 м від джерела забруднення фактичні концентрації діоксиду азоту дорівнюють гранично допустимій концентрації. Ця відстань перевищує розмір нормативної санітарно-захисної зони на 560 м.

У випадку, якщо на площі розсіювання спостерігаються концентрації забруднювальних речовин, що перевищують гранично допустиму концентрацію, проводять коригування санітарно-захисної зони з урахуванням рози вітрів.

Розраховані розміри коригованої санітарно-захисної зони згідно з формулою (4.1) зазначено у таблиці 4.6 ($L_0 = 1560$ м).

Таблиця 4.6

Результати визначення коригованого розміру санітарно-захисної зони для оксиду вуглецю за коефіцієнта $\alpha = 1$ надлишку повітря

Максимальна середньомісячна повторюваність напрямку вітру даного румбу протягом року		$\frac{P}{P_0}$	Коригована СЗЗ, м
Напрямок	Повторюваність від джерела, %		
Північ	10,7	0,856	1335,36
Північний схід	9,7	0,776	1210,56
Схід	16,0	1,28	1996,8
Південний схід	9,4	0,752	1173,12
Південь	11,8	0,944	1472,64
Південний захід	12,1	0,968	1510,08
Захід	16,9	1,352	2109,12
Північний захід	13,4	1,072	1672,32

Вуглець оксид. Розрахунок виконано 14.03.2016 о 15:34 програмою Еол-Плюс, версія 5.23
2600.0

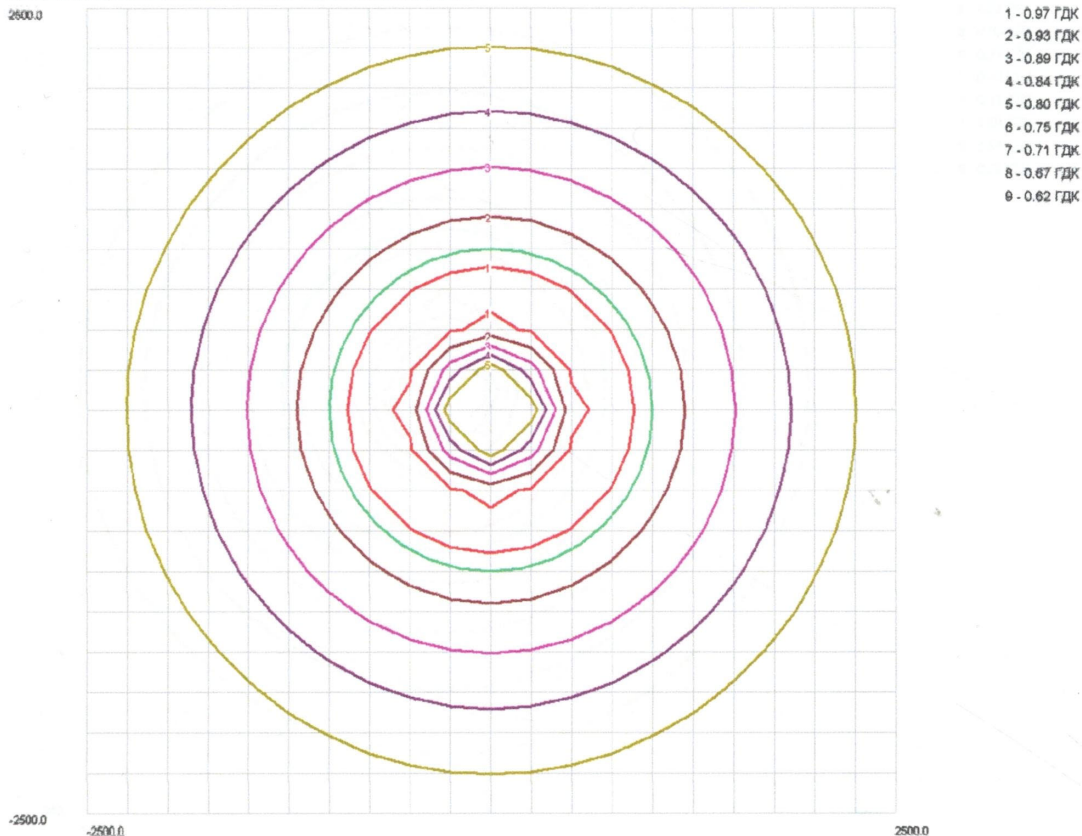


Рис. 4.11. Розрахункові дані розсіювання оксиду вуглецю по радіусу від джерела викидів за коефіцієнта $\alpha = 1,1$ надлишку повітря

Як видно із рисунка 4.11, основні параметри розсіювання оксиду вуглецю за коефіцієнта надлишку повітря 1,1 становлять:

- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони максимальньо 0,97 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони мінімально 0,84 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації за межами санітарно-захисної зони максимальньо 0,93 ГДК;
- перевищень гранично допустимої концентрації не спостерігається на всій площі розсіювання, як у межах, так і за межами санітарно-захисної зони.

Вулцаро овод, Розрахунок виконано 14.03.2016 о 16:41 програмою Еон-Плюс, версія 5.23
2500.0

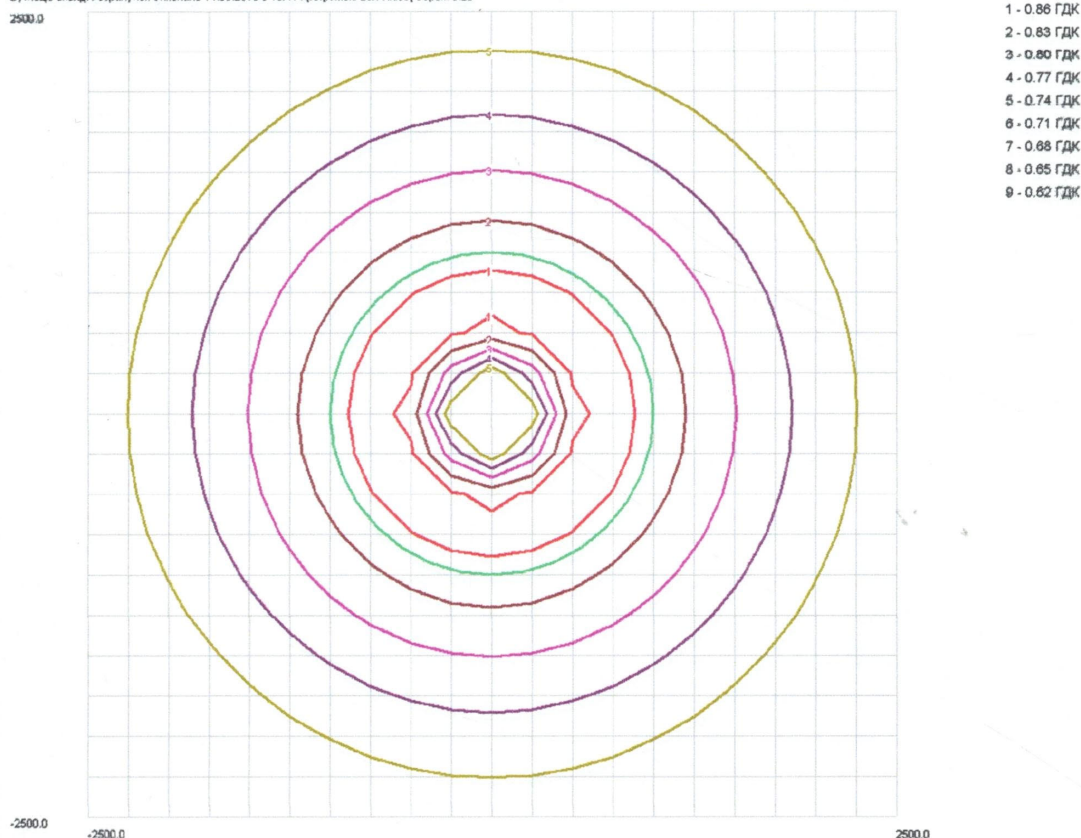


Рис. 4.12. Розрахункові дані розсіювання оксиду вуглецю по радіусу від джерела викидів за коефіцієнта $\alpha = 1,3$ надлишку повітря

Як видно із рисунка 4.12, основні параметри розсіювання оксиду вуглецю за коефіцієнта надлишку повітря 1,3 становлять:

- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони максимальньо 0,86 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони мінімально 0,74 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації за межами санітарно-захисної зони максимальньо 0,83 ГДК;
- перевищень гранично допустимої концентрації не спостерігається на всій площі розсіювання, як у межах, так і за межами санітарно-захисної зони.



Рис. 4.13. Розрахункові дані розсіювання оксиду вуглецю по радіусу від джерела викидів за коефіцієнта $\alpha = 1,6$ надлишку повітря

Як видно із рисунка 4.13, основні параметри розсіювання оксиду вуглецю за коефіцієнта надлишку повітря 1,6 становлять:

- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони максимальньо 0,72 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації в межах санітарно-захисної зони мінімально 0,66 ГДК;
- відношення фактичної концентрації до гранично допустимої концентрації за межами санітарно-захисної зони максимальньо 0,70 ГДК;
- перевищень гранично допустимої концентрації не спостерігається на всій площі розсіювання, як у межах, так і за межами санітарно-захисної зони.

Як видно з результатів розрахунку, викиди газоперекачувального агрегату ГПА оснащеного ГТД типу ГТК-10І компресорної станції, мають

суттєвий вплив на атмосферу за всіма трьома речовинами. Залежно від умов спалювання (коефіцієнт надлишку повітря) ступінь цього впливу різний.

На рисунку 4.14 показано нормативну санітарно-захисну зону та кореговані її розміри відповідно до рози вітрів.

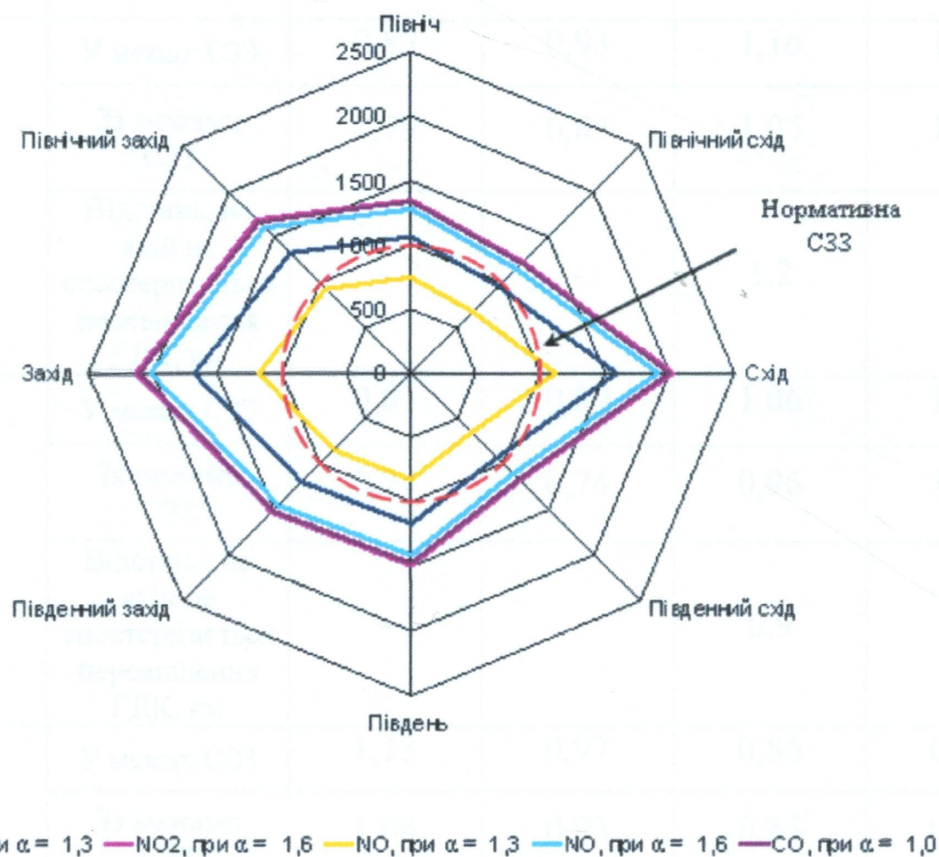


Рис. 4.14. Кориговані відповідно до рози вітрів та нормативна СЗЗ для забруднювальних речовин

Як видно з рисунка 4.14, розміри коригованої санітарно-захисної зони за різних значень коефіцієнта надлишку повітря можуть суттєво перевищувати нормативні розміри.

Результати розрахунку розсіювання зведені в таблиці 4.7 та на рисунках 4.15–4.17.

За результатами розрахунків встановлено, що із зростанням коефіцієнта α приземні концентрації оксидів азоту зростають, а оксиду вуглецю зменшуються.

Зведені результати розрахунку розсіювання забруднювальних речовин

Викидні гази	Параметр	Коефіцієнт надлишку повітря			
		1,0	1,1	1,3	1,6
NO ₂	У межах СЗЗ	0,87	0,93	1,16	1,41
	За межами СЗЗ	0,79	0,85	1,05	1,27
	Відстань, на якій не спостерігається перевищення ГДК, км	-	-	1,2	1,6
NO	У межах СЗЗ	0,81	0,89	1,06	1,25
	За межами СЗЗ	0,74	0,74	0,96	1,13
	Відстань, на якій не спостерігається перевищення ГДК, км	-	-	0,9	1,5
CO	У межах СЗЗ	1,13	0,97	0,86	0,72
	За межами СЗЗ	1,08	0,93	0,83	0,70
	Відстань, на якій не спостерігається перевищення ГДК, км	1,6	-	-	-

Виходячи з того, що зменшити концентрації оксидів азоту у викидах ГПА шляхом вжиття спеціальних засобів на практиці важко, під час наладки режиму горіння слід брати до уваги лише концентрації оксидів азоту. Тобто, з точки зору впливу на довкілля спалювання газу у камерах ГПА слід проводити з $\alpha = 1...1,1$.

Щодо оксиду вуглецю, то зважаючи на досить суттєве перевищення ГДК за значень $\alpha = 1...1,1$ (таблиця 4.7), доцільно розробити спеціальні заходи, які дозволяють знизити концентрації CO у викидах ГПА.

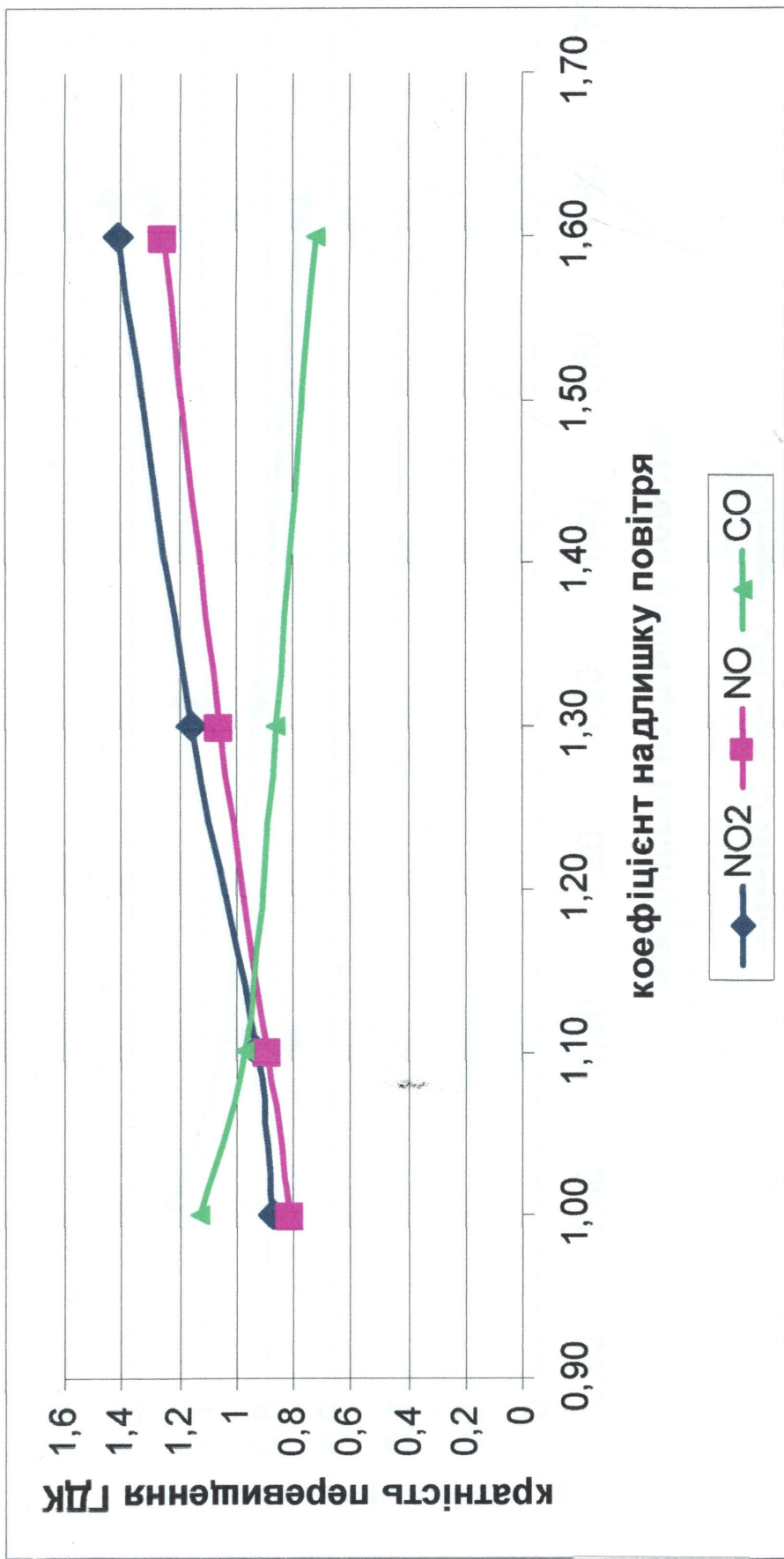


Рис. 4.15. Залежність максимальних значень кратності перевищення ГДК на території СЗЗ від коефіцієнта α надлишку повітря

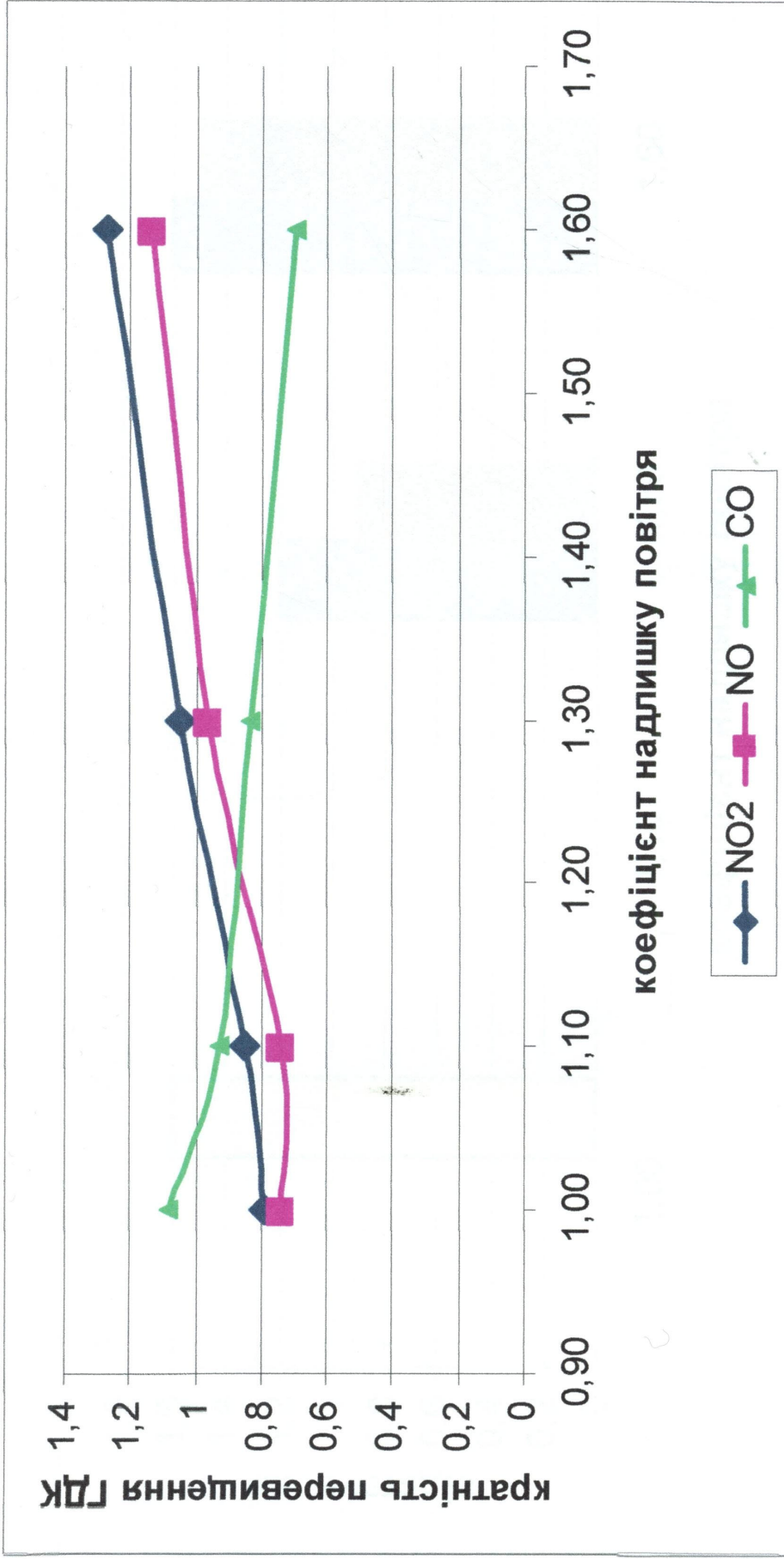


Рис. 4.16. Залежність максимальних значень кратності перевищення ГДК за територією СЗЗ від коефіцієнта α надлишку повітря

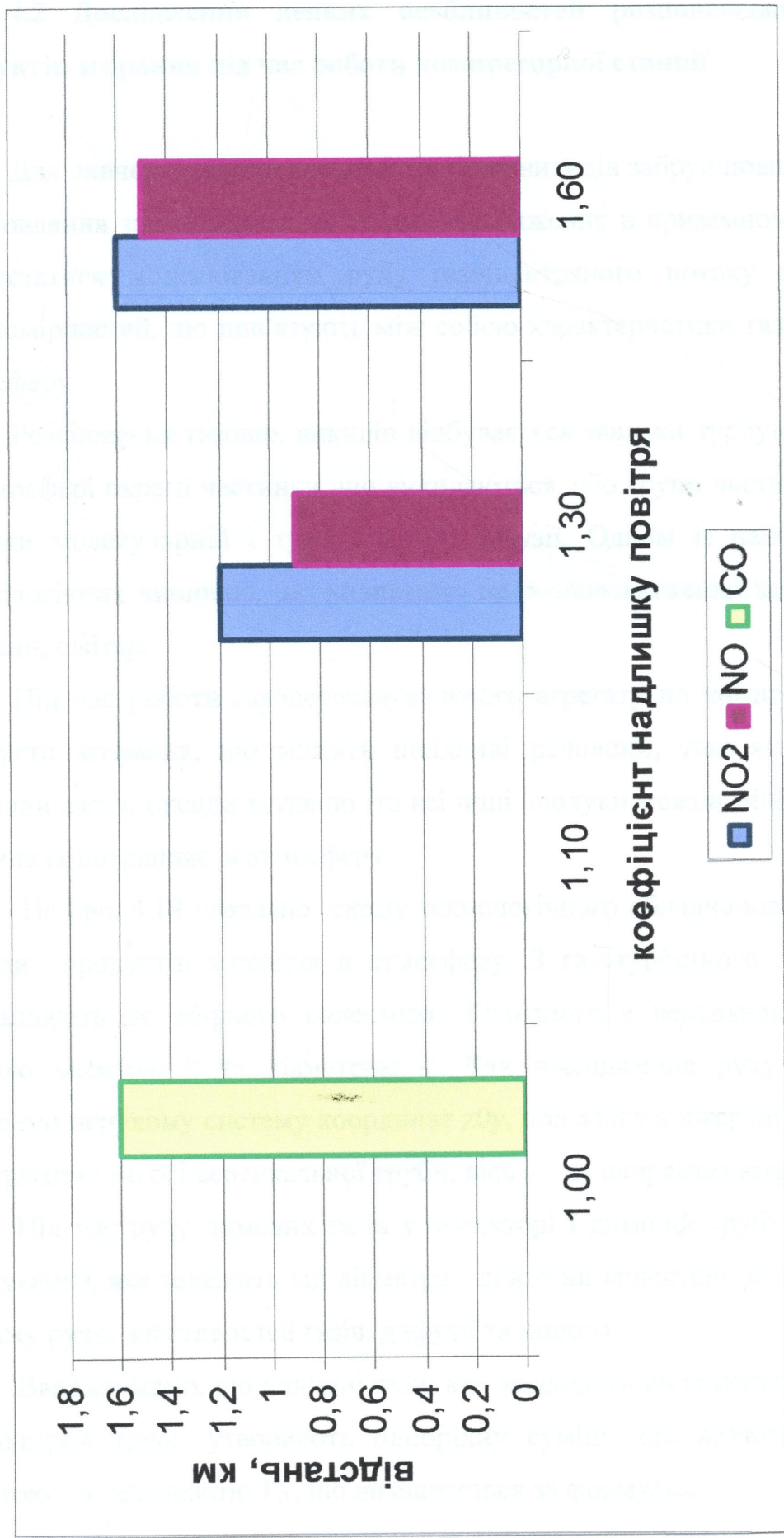


Рис. 4.17. Залежність відстаней, на яких відбувається розсіювання забруднювальних речовин до нормативних значень від коефіцієнта α надлишку повітря

4.2 Дослідження деяких особливостей розповсюдження викидів продуктів згорання під час роботи компресорної станції

Для вивчення явища розповсюдження викидів забруднювальних речовин, встановлення закономірностей їх розповсюдження в приземному шарі, можна скористатися моделюванням руху газоповітряного потоку з урахуванням закономірностей, що пов'язують між собою характеристики газового викиду в атмосферу.

Розсіювання газових викидів відбувається завдяки турбулентній дифузії. В атмосфері окремі частинки, що викидаються, або групи частинок, рухаються завдяки молекулярній і турбулентній дифузії. Одним із найбільш суттєвих метрологічних чинників, що впливають на розповсюдження забруднювальних речовин, є вітер.

Під час роботи газоперекачувального агрегату на компресорній станції продукти згорання, що містять шкідливі речовини, такі як оксиди азоту, діоксиди азоту, оксиди вуглецю та всі інші сполуки можна мінімізувати, проте частина їх потрапляє в атмосферу.

На рис. 4.18 показано схему технологічного обладнання, що забезпечує викиди продуктів згорання в атмосферу. З газотурбінного двигуна викиди потрапляють до збірного колектора, з'єданого з вертикальною викидною трубою висотою h та діаметром d . Для дослідження руху частинок газу виберемо нерухому систему координат zOy , пов'язану з джерелом викидів. Вісь z напрямимо по осі вертикальної труби, вісь y – за напрямом вітру.

Під час руху димових газів у колекторі і димовій трубі відбувається їх змішування, яке залежить від діаметра і довжини колектора та викидної труби, режиму руху, властивостей газів, дифузії та іншого.

Вважатимемо, що викидні гази, які надходять до колектора, змішуючись у викидній трубі, утворюють однорідну суміш, яка викидається із труби висотою h зі швидкістю V_0 , що визначається за формулою:

$$V_0 = \frac{Q}{f}, \quad (4.2)$$

де Q – витрати викидного газу, м³/с; f – площа поперечного перерізу труби.

Рух димових газів в атмосферному повітрі складається з переносного руху середовища та відносного руху викидних частинок – продуктів згорання. Під час руху газовикидної суміші проходять мікрвзаємодії елементарних частинок в часі та просторі. У першому наближенні вважаємо, що центр виділеного об'єму рухається по криволінійній траєкторії, яка не змінюється від дифузійних процесів. На виділений об'єм викидного газу діють сила G ваги і сила F_e тиску вітру, які визначаються:

$$G = m \cdot g, \quad (4.3)$$

$$F_e = k \cdot y', \quad (4.4)$$

де m – маса газу; g – прискорення земного тяжіння; k – коефіцієнт пропорційності; $y' = v_e$ – швидкість вітру.

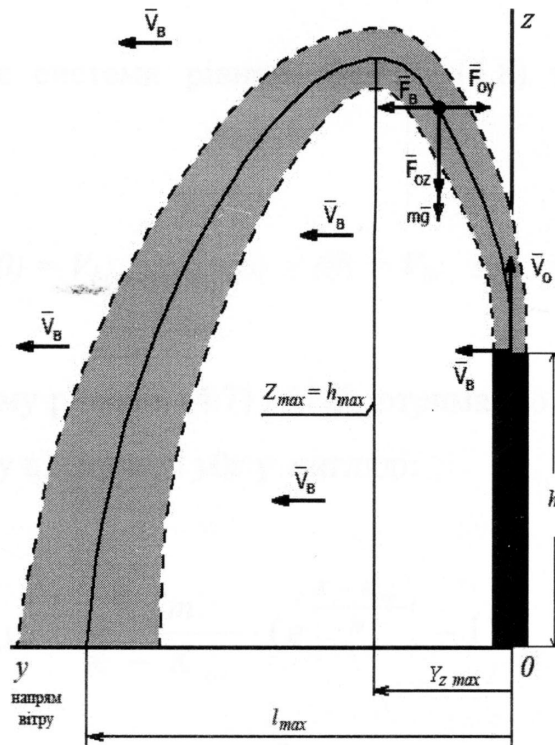


Рис. 4.18. Траєкторія розповсюдження викидів продуктів згорання в атмосфері

Під час руху вгору сила F_{oz} опору рухові напрямлена по осі z в протилежний бік, а під час руху в горизонтальному напрямку – сила F_{oy} паралельна до осі y в бік, протилежний до руху.

$$F_{oy} = K_{oy} \cdot y', \quad (4.5)$$

$$F_{oz} = K_{oz} \cdot z', \quad (4.6)$$

де K_{oy} і K_{oz} – коефіцієнти опору рухові в напрямках осей y і z ; y' , z' – проекції швидкостей центра виділеного об'єму на осі y і z .

Напрямки зазначених сил показано на рис. 4.18. Скориставшись принципом Даламбера, складемо диференціальні рівняння руху виділеного об'єму – розповсюдження речовин з викидної труби в проекціях на осі y і z у вигляді:

$$my'' - (K + K_{oy}) \cdot y' = 0, \quad (4.7)$$

$$mz'' + K_{oz} \cdot z' + mg = 0. \quad (4.8)$$

Для розв'язування системи рівнянь (4.7) і (4.8) запишемо початкові умови, якщо:

$$t = 0; \quad y'(0) = V_b; \quad y(0) = 0; \quad z'(0) = V_0; \quad z(0) = h. \quad (4.9)$$

Розв'язавши систему рівнянь (4.7) і (4.8), отримаємо закономірності руху центра виділеного об'єму в площині yOz у вигляді:

$$y = \frac{V_b m}{K - K_{oy}} \cdot \left(e^{\frac{K - K_{oy}}{m} t} - 1 \right), \quad (4.10)$$

$$z = \frac{1}{K_{oz}^2} \left(hK_{oz}^2 + m^2 g + mV_o - (m^2 g + mV_o) e^{\frac{-K_{oz} t}{m}} - mgK_{oz} t \right). \quad (4.11)$$

Залежності (4.10) і (4.11) описують рух центра виділеного об'єму в площині осей yOz . Якщо з цих залежностей вилучити параметр t , то отримаємо рівняння траєкторії руху центра виділеного об'єму у вигляді:

$$z = \frac{1}{K_{oz}^2} \left(hK_{oz}^2 + m(gm + V_o) - m(mg + V_o) e^{\frac{-K_{oz} - \ln\left(\frac{mV_B + y(K - K_{oy})}{mV_B}\right)}{K - K_{oy}}} - \frac{m^2 g K_{oz}}{K - K_{oy}} \ln \left| \frac{mV_B + y(K - K_{oy})}{mV_B} \right| \right). \quad (4.12)$$

Якщо задатися числовим значенням величин, що входять до залежності (4.11), то можна побудувати траєкторію руху викидних частинок.

Тривалість T руху викидів з димової труби до приземлення, можна визначити з рівняння (4.11) при $z = 0$. Розв'язавши це рівняння отримаємо значення:

$$T = f(h, V_o, m, g, K_{oz}). \quad (4.13)$$

Підставивши знайдене значення T в рівняння (4.10) знайдемо дальність розповсюдження викидів, тобто:

$$y_{\max} = l_{\max} = \frac{V_e m}{K - K_{oy}} \left(e^{\frac{K - K_{oy} T}{m}} - 1 \right). \quad (4.14)$$

Залежність (4.14) дозволяє оцінити вплив швидкості V_o викиду продуктів згорання, швидкості V_e вітру, опору середовища K, K_{oy}, K_{oz} , висоти h і діаметра викидної труби на дальність l_{\max} розповсюдження продуктів згорання.

Запропонований підхід дозволяє також визначити максимальну висоту підйому продуктів згорання. Для цього необхідно прирівняти $z' = 0$, знайти час підйому частинок на максимальну висоту і, підставивши його в (4.11), знайти h_{\max} . Ці залежності можна використати для якісної оцінки впливу характеристик середовища, вітрового навантаження і технологічних параметрів викиду,

діаметра та висоти викидної труби і кількості викидних газів на перенесення викидних речовин у просторі. Запропоновані розрахункові залежності дозволяють оцінити зміну дальності розповсюдження шкідливих речовин залежно від швидкості викидних газів, висоти димової труби, напрямку і швидкості вітру та інших параметрів.

Для контролювання ступеня забруднення повітря твердими частинками ми запропонували екологічній службі Богородчанського ЛВУМГ пристрої, захищені патентами України.

1. Пристрій для контролювання забруднення повітря твердими частинками [138].

В основу корисної моделі поставлене завдання здешевити проведення аналізу забруднення повітря. Для його створення використовують дозатор повітря, прозору місткість з рідиною, фотометр (пиктометр) з реєструвальним приладом. Надійність приладу в використанні стандартних недорогих комплектуючих. Як робочу рідину використовують воду. Конструктивна схема пристрою показана на рис. 4.19. Пристрій складається з дозатора 1 повітря, місткості 2 з рідиною, стабільного джерела 3 світла, фотоприймача 4, реєструвального пристрою 5. Пристрій встановлюють у приміщенні або на території, де є необхідність фіксувати забруднення повітря твердими частинками.

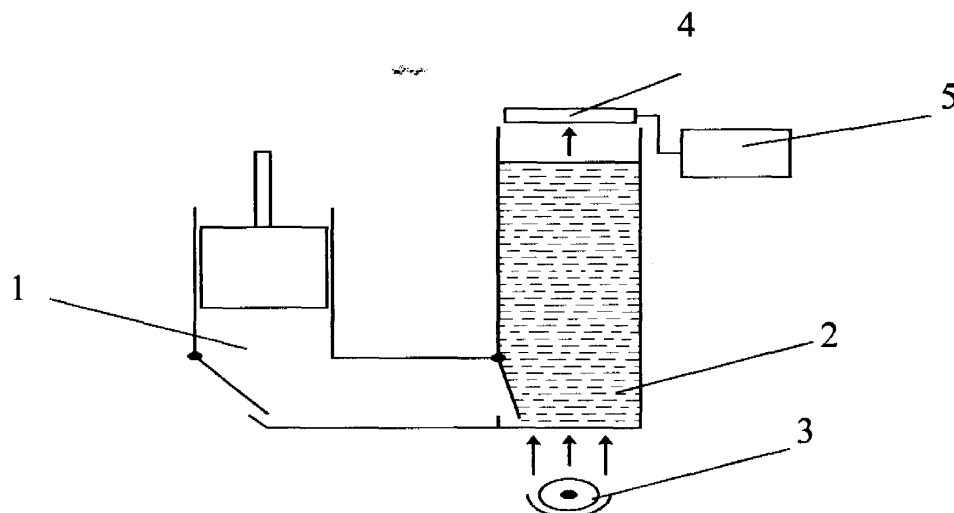


Рис. 4.19. Функціональна схема пристрою для контролювання забруднення повітря твердими частинками

Порція повітря з забрудненими частинками подається дозатором повітря 1 в нижню частину місткості 2 з рідиною. При проходженні бульбашок повітря через рідину тверді частинки залишаються в ній. Світлові промені від стабілізованого джерела світла 3 проходять через прозору частину місткості 2 з рідиною. Частково енергію променів поглинають тверді частинки і ця величина залежить від їх кількості на шляху до цих променів. Зміну світлового потоку фіксує фотоприймач 4 і передає на реєструвальний прилад (ноутбук з відповідним програмним забезпеченням).

Цей прилад забезпечує здешевлення процесу контролювання забруднення повітря твердими частинками. Отже, запропонований новий пристрій для контролю забруднення повітря твердими частинками, що містить дозатор повітря, місткість з рідиною, стабілізатор джерела світла, який додатково має фотоприймач, та реєструвальний прилад, причому порцію контрольованого повітря пропускають через рідину, а густину твердих частинок в рідині визначають фотометричним методом.

2. Пристрій для контролювання концентрації твердих частинок у повітрі [139].

В основу корисної моделі поставлено завдання спростити контроль за концентрацією твердих частинок у повітрі. Запропоновано використати той факт, що пилові частки у повітрі несуть на собі електричний заряд.

На рис. 4.20 зображено функціональну схему присторою, який складається з корпусу приладу 1, приладу для рівномірної подачі повітря 2, електропровідної сітки 3, електровимірювального приладу 4.

Пристрій працює таким чином. Прилад для рівномірної подачі повітря, в якому є тверді частинки, проганяє його по корпусу, в якому впоперек потоку розміщена ізольована від корпусу електропровідна сітка. Дрібні частинки, що є в повітрі, несуть на собі електричний заряд і віддають його електропровідній сітці, пов'язаній з електровимірювальним приладом. Величина електричного заряду пропорційна до кількості частинок, які вони віддають сітці. Заміряючи в

сітці електричний заряд, який віддають частинки провідній сітці, оцінюємо ступінь концентрації твердих частинок у повітрі.

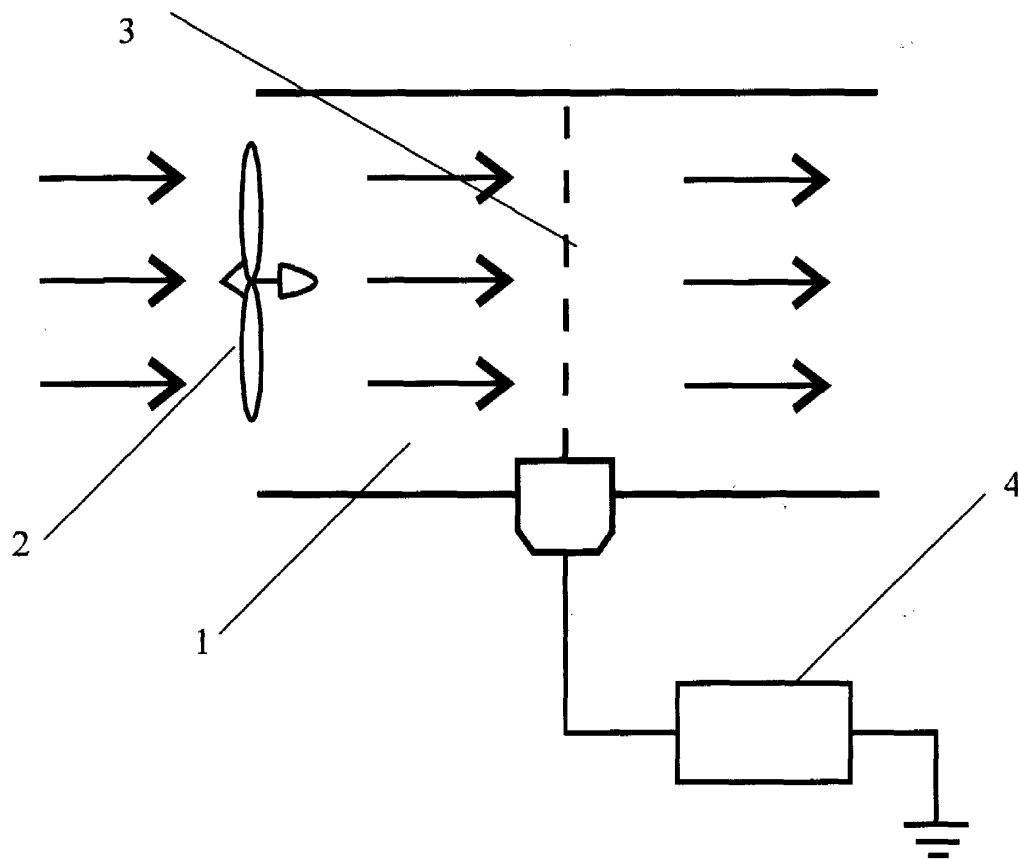


Рис. 4.20. Принципова схема пристрою для контролю концентрації твердих частинок у повітрі

Запропонований новий пристрій забезпечує вимірювання концентрації забруднення повітря твердими частинками. Пристрій містить дозатор для рівномірної подачі повітря, в потоці повітря встановлена електропровідна сітка, з'єднана з електровимірвальним приладом.

Отже, використовуючи стандартні прилади, а також запропоновані нові пристрої, методики для визначення концентрації викидних газів та твердих частинок і їх розповсюдження щодо джерел викиду, можна контролювати екологічні характеристики забруднення повітря продуктами згорання газу на території компресорної станції.

4.3 Розроблення й реалізація способу та схеми пристрою для зменшення викидів оксиду вуглецю в атмосферу

Відомі способи очищення та знешкодження викидних газів від оксидів вуглецю каталітичним, або абсорбційним методом [140]. Вони є високозатратними, потребують високовартісних матеріалів і обладнання, в процесі роботи створюють додатковий аеродинамічний опір викидним газам.

Заслуговує на увагу спосіб очищення технологічних газів від оксиду вуглецю при синтезі водню конверсійним способом [141]. Цей спосіб зовсім непридатний для екологічного очищення викидних газів КС, оскільки потребує застосування високих тисків, складного технологічного обладнання і може бути застосований лише для очищення малих об'ємів газів.

Відомий каталізатор, спосіб його приготування і спосіб окислення оксиду вуглецю [113], недоліком якого є складна заміна каталізатора і наявність складного обладнання, які потребують великої поверхні.

Також відомий спосіб очищення викидних газів котельних установок від оксиду вуглецю та пристрій його реалізації [142], який взято за прототип. Їх недоліком є те, що очищення відбувається в неповному обсязі, оскільки не вся маса газу під час проходження через трубки контактує з поверхнею, через те що система трубок створює додатковий опір виходу газу.

Ми запропонували корисну модель [143] для підвищення ефективності та зменшення габаритів пристрою. Ефективність пристрою полягає в довговічності його роботи (лампи ДРК 2200 год). Зменшення габаритів полягає в тому, що ультрафіолетові лампи безпосередньо розміщуються в потоці повітря від компресора.

В основу способу корисної моделі поставлено завдання вдосконалення очищення СО в викидних газах газотурбінних установок, що полягає в додатковій подачі іонізованого повітря у викидні гази, а пристроєм для цього служить повітряний компресор та іонізаційна камера з лампами ультрафіолетового світла, що подає повітря у викидні гази. У вирішенні

поставленого завдання було взято той факт, що іонізовані молекули O_2 в повітрі змішуються з викидами газів, сприяють перетворенню газу CO в CO_2 [113].

На рис. 4.21 зображено функціональну схему запропонованого пристрою для здійснення способу очищення CO у викидних газах. Він складається з повітряного компресора 1, іонізаційної камери 2, лампи ультрафіолетового світла 3, викидної труби турбіни 4, димової труби 5 і турбіни 6.

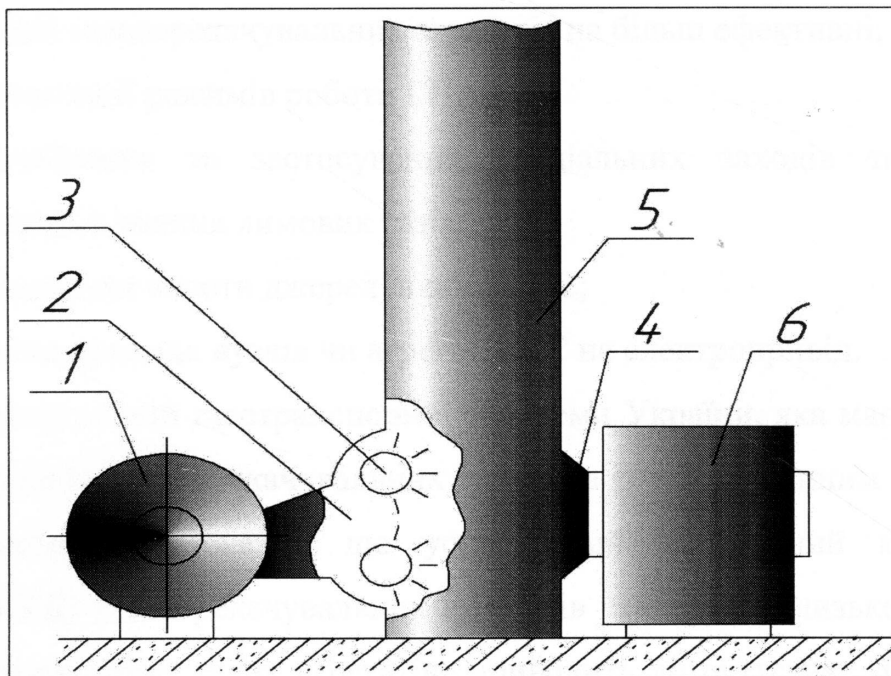


Рис. 4.21 Рекомендована принципова схема пристрою для здійснення доокислення оксиду вуглецю CO у викидних газах газотурбінної установки

Для здійснення способу необхідно у викидну трубу 4, турбіни 6, через вхід, що сполучає її з іонізаційною камерою 2 за допомогою повітряного компресора 1, подати повітря, яке, проходячи через іонізаційну камеру 2, іонізується ультрафіолетовими лампами 3 і змішується з викидними газами, у викидній трубі 4. Іони кисню, змішуючись з молекулами CO , вступають у реакцію доокислення до CO_2 , що в остаточному результаті приводить до очищення викидних газів від оксиду вуглецю.

4.4. Розроблення рекомендацій для зменшення шкідливих викидів під час роботи газоперекачувального агрегата ГПА типу ГТК-101

Зазначені дослідження показують, що для зниження концентрацій забруднювальних речовин (CO , NO_x) в атмосферному повітрі під час роботи КС можна досягнути шляхом:

- заміни газоперекачувальних агрегатів на більш ефективні;
- оптимізації режимів роботи ГПА;
- розроблення та застосування спеціальних заходів та засобів утилізації та знешкодження димових газів;
- збільшення висоти джерел викидів КС;
- заміни окремих вузлів чи агрегатів КС на електропривід.

Досвід експлуатації газотранспортної системи України, яка має в своєму складі близько 60 % газоперекачувальних агрегатів із газотурбінним приводом застарілої конструкції, показав, що усереднений ефективний коефіцієнт корисної дії (ККД) газоперекачувальних агрегатів становить близько 24-25 % [144, 145]. Використання таких агрегатів приводить до суттєвих перевитрат паливного газу приблизно до 1 млрд m^3 на рік. Тому одним із найефективніших напрямків зниження витрат на транспортування природного газу і зменшення викидів шкідливих речовин – продуктів згорання в атмосферне повітря є оновлення компресорних станцій шляхом заміни газотурбінних газоперекачувальних агрегатів на сучасні, які мають привід з ККД не нижче ніж 36 %. Така реконструкція компресорних станцій виконується за проектами ВАТ «ІВП ВНДПТрансгаз» і дасть змогу отримати значну економію паливного газу для роботи газоперекачувальних агрегатів зі зниженням екологічного навантаження на атмосферне повітря. Модернізація газотурбінних ГПА і впровадження більш економних нових типів газоперекачувальних агрегатів з підвищеним ККД – 35 % і вище – також сприяє зменшенню шкідливих викидів компресорних станцій.

Лещенко І. Ч. в роботі [96] описує три сценарії заміни обладнання на компресорних станціях відповідно до Енергетичної стратегії на період до 2030 року. Однак, як він вважає, що визначити скорочення викидів природного газу та шкідливих газів, внаслідок модернізації газотранспортної системи, не маючи детальної інформації про кількість і типи обладнання, яке необхідно замінити, сьогодні не можливо. Але попередні результати розрахунків показують, що за повного оновлення компресорного обладнання газотранспортної системи України можна досягти в 2030 році зниження викидів парникових газів на 26 % в порівнянні з несиметричним сценарієм, за яким буде проводитись оновлення низькими темпами.

Одним із суттєвих чинників зниження експлуатаційних витрат, зокрема перевитрат паливного газу, є використання у складі газотранспортної системи електропривідних газоперекачувальних агрегатів. У цьому напрямку ДК «Укртрансгаз» постійно здійснює реконструкцію, але її темпи ще недостатні. Загальний електричний ККД системи ТЕЦ-ЛЕП-ЕГПА становить близько 28,5- 29,5 %. Крім того, для ЕГПА необхідне електропостачання першої категорії надійності від двох незалежних джерел.

У газотурбінному приводі паливо використовується в камері згорання, відбувається перетворення хімічної енергії в механічну. Істотними перевагами ЕГПА є великий термін роботи (більше ніж 20 років), низька вартість їх ремонту, екологічна чистота. За кордоном електропривідні ГПА використовують обмежено в районах близького розташування до населених пунктів, курортних населених пунктів, де до компресорних станцій висувають підвищені вимоги щодо екологічних характеристик. Вартість реконструкцій КС у результаті застосування нових ЕГПА в 1,2-2 рази більші, ніж витрати для забезпечення роботи існуючих ГТД. Ці аргументи стримують їх широке впровадження. Проте, переведення окремих цехів компресорних станцій на електричний привід можна розглядати як перспективний.

Зменшення шкідливого впливу викидів компресорних станцій тісно пов'язане з удосконаленням технологічного обладнання, забезпеченням

герметичності і надійності його роботи. Необхідно модернізувати систему запуску двигунів, приєднання лінії продування компресорів ГПА до системи подачі паливного газу для використання як палива технологічного газу, який зазвичай викидається в атмосферу. Для уникнення пропусків газу в елементах механічної системи трубопроводів необхідна заміна лінійних кранів, та кранів обв'язки компресорних станцій. Використання комп'ютерних систем оперативної діагностики газоперекачувальних агрегатів забезпечує їх надійну роботу.

Проведені вище дослідження показують, що змінювати кількість шкідливих викидів в атмосферне повітря, можна шляхом керування режимами роботи ГПА. Регулювання робочих параметрів повинно забезпечувати пониження температури в камері згорання. Обґрунтовано це тим, що із зростанням температури молекула азоту повітря активується і стає більш здатною до окислення. Тобто оксиди азоту утворюються у більшій кількості. Найбільш суттєвий вплив на регулювання температури матиме коефіцієнт надлишку первинного повітря, а також інші параметри. У той самий час багатofакторність впливу різноманітних параметрів ГПА на концентрації викидів забруднювальних речовин ускладнюється ще й тим, що агрегати відрізняються між собою технічним станом, годинами напрацювання тощо.

Використовуючи одно- і багатofакторні залежності концентрації викидних газів оксиду азоту, діоксиду азоту та оксиду вуглецю залежно від коефіцієнта надлишку повітря, температури в камері згорання, витрат паливного газу та потужності можна підбирати такі режими роботи газоперекачувальних агрегатів, які забезпечують допустимий рівень викидів в атмосферу.

Важливим з точки зору зменшення шкідливого впливу викидів компресорних станцій в атмосферу є впровадження нових методів очищення продуктів згорання. Під цим заходом мається на увазі встановлення спеціального очисного обладнання, що прямо не впливає на технологічний процес, а знижує концентрацію вже утворених забруднювальних речовин

шляхом їх затримки, сепарації, поглинання тощо. Найбільш поширеними апаратами, застосовуваними для очищення пилогазових потоків, є різноманітні фільтри, циклони, сорбуючі матеріали тощо. Проте більшість із перелічених апаратів для очищення викидів забруднювальних речовин не в повній мірі можуть затримати тверді частинки у викидах при спалюванні газу. Одним з перспективних та ефективних методів очищення продуктів згорання газу є їх нейтралізація шляхом перетворення у нетоксичні речовини. Нами в цьому напрямку запропоновано використати патент України № 102157 на новий спосіб і пристрій знешкодження шкідливих газів CO газоперекачувальних агрегатів, який дозволяє завдяки доокисленню перетворити шкідливий для організму людини газ CO в нешкідливий газ CO₂. Така пропозиція за малих витрат коштів для виготовлення пристрою може, в деякій мірі, зменшити концентрацію оксиду вуглецю в районах розташування компресорних станцій. Очевидно, що спочатку необхідно провести експериментальне вивчення зміни кількості оксиду вуглецю за різних параметрів інтенсивності іонізуючого випромінювання і, після цього, випробувати промисловий варіант випромінювача.

Зі збільшенням висоти джерел викидів КС, відповідно до [137] концентрація забруднювальних речовин визначається за залежністю:

$$C_m = \frac{AMF_{mn\eta}}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}, \quad (4.15)$$

де A – коефіцієнт, що залежить від температурної стратифікації атмосфери; M (г/с) – маса забруднювальної речовини, що викидається за одиницю часу; F – безрозмірний коефіцієнт, що враховує швидкість осідання забруднювальних речовин в атмосферному повітрі; m і n – коефіцієнти, що враховують умови виходу газоповітряної суміші з джерела; H (м) – висота джерела викиду над рівнем землі (для наземних джерел при розрахунках приймається $H = 2$ м); η – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив рельєфу місцевості, у випадку рівнинної або слабогорбистої місцевості з перепадом висот, що не перевищує

50 м на 1 км, $\eta = 1$; $\Delta T (^{\circ}\text{C})$ – різниця між температурою викиду T_2 та температурою повітря навколишнього середовища T_0 ; $V_1 (\text{м}^3/\text{с})$ – витрата газоповітряної суміші.

З формули (4.15) випливає, що концентрація забруднювальних речовин обернено пропорційна до квадрату висоти джерела викиду. Тобто із зростанням висоти джерела викиду, розсіювання забруднювальних речовин відбувається в більшій мірі і, відповідно, зменшуються їх приземні концентрації. Необхідно зазначити, що згаданий спосіб розсіювання забруднювальних речовин може бути використаний як допоміжний, оскільки не зменшує саму потужність викиду, а лише сприяє її кращому розсіюванню.

Для зменшення впливу шкідливих викидів також необхідне економне використання енергетичних ресурсів, енергозберігального обладнання та систем, що дозволяють істотно економити паливо, зменшувати кількість шкідливих речовин, викидуваних в атмосферу.

Отже, на сьогодні необхідно забезпечити ефективну роботу газоперекачувальних агрегатів на компресорних станціях з урахуванням екологічної ситуації в районах їх розташування та запровадити нові і вдосконалити існуючі технології знешкодження шкідливих викидів.

Висновки до розділу

1. Отримані емпіричні моделі взаємозв'язку техніко-екологічних параметрів з витратою паливного газу і ККД ГТД на засадах генетичних алгоритмів дають змогу прогнозувати потужності викидів оксидів азоту NO_x (NO , NO_2) та оксиду вуглецю CO . Наявність таких моделей відкриває шляхи до вибору режимних параметрів, які забезпечують мінімізацію викидів газоперекачувальних агрегатів в атмосферу шкідливих речовин за заданих обсягів перекачування природного газу.

2. Регулювання робочого режиму роботи газоперекачувального агрегату шляхом зміни коефіцієнта надлишку повітря в середньому дозволяє

знизити концентрації оксиду азоту C_{NO} на 21 %, діоксиду азоту C_{NO_2} на 22 % та оксиду вуглецю C_{CO} на 37 %.

3. За результатами розрахунків встановлено, що із зростанням коефіцієнта надлишку повітря приземні концентрації оксидів азоту зростають, а оксиду вуглецю зменшуються. Виходячи з того, що зменшити концентрації оксидів азоту у викидах ГПА шляхом вжиття спеціальних засобів на практиці важко, під час налагоджування режиму горіння слід брати до уваги лише концентрації оксидів азоту. Тобто, з точки зору впливу на довкілля спалювання газу у камерах ГПА слід проводити з $\alpha = 1...1,1$. Щодо оксиду вуглецю, то зважаючи на досить суттєве перевищення ГДК при значеннях $\alpha = 1...1,1$, доцільно розробити спеціальні заходи, які дозволяють знизити концентрації CO у викидах ГПА.

4. Використання запропонованого способу подачі іонізованого повітря викидних газів в зону змішування з атмосферним повітрям дозволяє знизити концентрації оксиду вуглецю у викидах газоперекачувального агрегату.

ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень вирішено важливе науково-технічне завдання підвищення рівня екологічної безпеки атмосферного повітря у районах розташування компресорних станцій шляхом встановлення теоретичних і експериментальних залежностей процесів згорання газу в камерах згорання, утворенням викидних газів, які містять оксиди азоту та оксиди вуглецю при різних режимах роботи газоперекачувальних агрегатів типу ГТК-10І, що дозволяє зробити такі висновки:

1. Встановлено залежності коефіцієнтів теплопередачі, температури вторинного повітря на вході в зону змішування на основі створеної аналітичної моделі камери згорання газотурбінного агрегату за відомими параметрами режиму експлуатації агрегату.

2. Отримано нові узагальнені багатofакторні математичні залежності зміни концентрації викидів оксидів азоту і вуглецю при зміні витрат газу, потужності, коефіцієнта надлишку повітря та температури згорання газу ГПА та встановлено, що зі зростанням:

- коефіцієнта надлишку повітря концентрація викидних газів оксиду і діоксиду азоту зростає, а оксиду вуглецю зменшується;
- температури згорання концентрація викидних газів оксиду і діоксиду азоту зростає, а оксиду вуглецю зменшується;
- витрати газу та потужності газотурбінного двигуна концентрації викидних газів оксиду азоту і оксиду вуглецю незначно змінюються, а концентрації діоксиду азоту зростають.

На основі статистичної обробки даних і аналізу рівнянь множинної регресії з урахуванням ступеня варіації параметрів, закладених у рівняння множинної регресії, встановлено, що найбільший вплив на зміну концентрації оксидів азоту та оксиду вуглецю має коефіцієнт надлишку повітря.

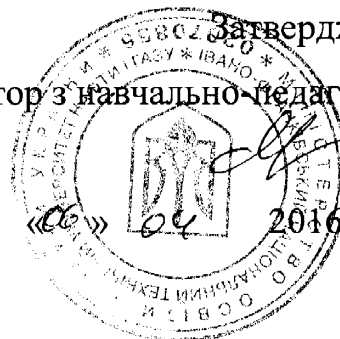
3. За результатами теоретичних і експериментальних досліджень встановлено, що зі зростанням коефіцієнта надлишку повітря викидні

концентрації оксидів азоту зростають, а оксиду вуглецю – зменшуються. Відстань, на яку розповсюджуються продукти згорання, пропорційна швидкості вітру і функціонально пов'язана з масою та швидкістю викидів продуктів згорання, висотою викидної труби, коефіцієнтами опору середовища.

4. Запропоновано новий пристрій і спосіб для часткового знешкодження оксиду вуглецю у викидних газах компресорних станцій шляхом їх іонізації ультрафіолетовими випромінювачами для доокислення молекул оксиду вуглецю та утворення діоксиду вуглецю, що сприяє очистці викидних газів від оксиду вуглецю, а також нові пристрої для контролю концентрації твердих частинок викидних газів в атмосферне повітря та контролю забруднення повітря твердими частинками.

ДОДАТКИ

Затверджую
 проректор з навчально-педагогічної роботи
 Дзьоба О.Г.
 «06» 04 2016 року



АКТ

впровадження у навчальний процес результатів дисертаційного дослідження

Засвідчуємо, що основні положення кандидатської дисертації Михайлюк Ю.Д. на тему «Підвищення рівня екологічної безпеки атмосферного повітря в районах розташування компресорних станцій» впроваджені у навчальний процес на кафедрі екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу і використовуються при викладанні дисциплін для освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр напряму підготовки 6.040106 – Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування.

Матеріали дисертаційного дослідження Михайлюк Ю.Д. використовуються студентами освітньо-кваліфікаційного рівня магістр зі спеціальності 8.04010601 – Екологія та охорона навколишнього середовища у їх науково-дослідній праці при виконанні магістерських робіт.

Директор
інженерно-екологічного інституту

Завідувач кафедри екології

Аспірант

М.П. Мазур

Я.О. Адаменко

Ю.Д. Михайлюк



**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКА ОБЛАСНА ДЕРЖАВНА АДМІНІСТРАЦІЯ
УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЇ ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ**

вул. Сахарова 23 А, м. Івано-Франківськ, 76014, тел./факс 52-61-50; e-mail: ifecobez@gmail.com Код ЄДРПОУ 40008068

05.04 . 2016 р. № 1

На № _____ від _____ 2016 р.

АКТ

**впровадження науково-дослідної
роботи Михайлюк Ю.Д. «Підвищення рівня екологічної безпеки
атмосферного повітря в районах розташування компресорних станцій »**

На основі теоретичних досліджень Михайлюк Ю.Д. встановлені залежності для визначення коефіцієнтів теплопередачі, температури вторинного повітря на вході в зону змішування камери згорання ГТУ шляхом математичного моделювання при відомих режимах їх експлуатації, а також отримані багатofакторні залежності зміни концентрації викидів продуктів згорання при різних режимах роботи агрегатів, які можна використати в подальшій роботі при екологічних розрахунках. Вивчені закономірності розповсюдження продуктів згорання в атмосфері при роботі компресорних станцій.

Запропоноване технічне рішення, захищене патентом, пов'язане з знешкодженням шкідливих викидних речовин при перекачуванні природного газу газотурбінними агрегатами шляхом подачі іонізованого повітря в потік викидних газів. Таке рішення може служити методичною основою для удосконалення обліку викидних продуктів згорання в атмосферу при роботі компресорних станцій.

Начальник управління



Р.С. Гасимов

АКТ

**впровадження результатів науково-дослідної
роботи Ю.Д.Михайлюк «Підвищення рівня екологічної безпеки
атмосферного повітря в районах розташування компресорних станцій»**

В дисертаційній роботі Михайлюк Ю.Д. вирішується актуальна проблема природно-господарського значення щодо покращення екологічної безпеки при транспортуванні природного газу.

Наукові дослідження Михайлюк Ю.Д. пов'язані з виконанням цільової екологічної програми «Програми охорони навколишнього природного середовища в межах території Богородчанського ЛВУМГ на 2010-2015 рр.», в якій використані запропоновані автором методології, моделювання роботи камери згорання газоперекачувальних агрегатів магістральних газопроводів, отримані багатофакторні залежності зміни концентрації викидних продуктів згорання при різних режимах роботи агрегатів. Встановлені залежності дають змогу оцінити зміну концентрації викидів оксидів і діоксидів азоту і вуглецю на різних режимах перекачки газу. Ці дослідження сприяють удосконаленню обліку викидів продуктів згорання.

Михайлюк Ю.Д. запропоновано підприємству для часткової утилізації продуктів згорання викидного газу оксиду вуглецю нове технічне рішення, захищене патентом, яке пов'язане з подачею іонізованого повітря в потік викидних газів. Це дозволяє доокислити шкідливий газ окис вуглецю до діоксиду вуглецю, що забезпечує покращення екологічної ситуації на території компресорної станції.

Головний інженер УМГ



В.В. Костів

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Екологічна безпека нафтогазових об'єктів / [Говдяк Р. М., Семчук Я. М., Чабанович Л. Б., та ін.]. – Івано-Франківськ, 2007. – 554 с.
2. Аكوпова Г. С. Экологические проблемы при эксплуатации и проектировании объектов хранения газа / Г. С. Аكوпова, А. Е. Артюнов // Междунар. конф. по подземному хранению газа (Москва, 11- 15 сентября 1995 г.). Секция В. Технические аспекты создания ПХГ. – М. : 1995. 4.1 – С. 94-99.
3. Енергоекoлогічна безпека нафтогазових об'єктів / [Р. М. Говдяк, Я. М. Семчук, Л. Б. Чабанович та ін.] – Івано-Франківськ : Лілея-НВ, 2007. – 554 с.
4. Охорона праці (питання та відповіді) [Електронний ресурс] : навчальний посібник / Москальова В. М., Батлук В. А., Кусковець С. Л., Феленчук В. Л. – 2011. – Режим доступу: <http://pidruchniki.ws/>.
5. Раєвський В. Охорона навколишнього природного середовища в Україні / В. Раєвський. – К. : Видавництво Раєвського, – 1997. – 95 с.
6. Любчик Г. Н. Экологические показатели воздействия энергетических установок на окружающую среду / Г. Н. Любчик, Д. М. Плоткин // Пром. Теплоэнергетика. – 1992 – № 1-3, т. 14. – С. 72–78.
7. Щуровский В. А. Ограничение выбросов оксида азота / В. А. Щуровский, А. З. Шайхутдинов, С. Ф. Жданов // Газовая промышленность. – 1996. – № 9-10. – С. 72–73.
8. Реконструкция газоперекачивающих агрегатов ГТК-10 в Тюменском регионе / А. М. Бойко, Г. Н. Поляков, К. Ф. Отт [та ін.] // Природный газ в странах СНГ и восточной Европы. Приложение к журналам «Petroleum economist». Газовая промышленность. «Gas word international». – 1997. – № 5. – С. 53–54.
9. Сударев А. В. Камеры сгорания газотурбинных установок / А. В. Сударев, В. А. Маев. – Л. : Недра, – 1990. – 274 с.

10. Виноградов В. Д. Экологическая модернизация ГПА на компрессорных станциях Рургаза / В. Д. Виноградов, Ю. И. Захаров, А. В. Сударев // Газотурбинные технологии. – 2001. – № 4. – С. 8–13.

11. Адаменко О. М. Екологічна безпека в нафтогазовому комплексі та шляхи подолання екологічної кризи на Прикарпатті / О. М. Адаменко // Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ. – 2001. – Вип.38. – С.19–22.

12. Михайлюк Ю. Д. Екологічний стан території компресорних станцій / Ю. Д. Михайлюк // Науковий вісник НЛТУ України : збірник науково-технічних праць. Вип. 24.2. – Львів : РВВ НЛТУ України, 2014. – С. 119–124.

13. Сухарев С. М. Основы экологии та охорони довкілля / Сухарев С. М., Чундак С. Ю., Сухарева О. Ю. – К. : Цент навчальної літератури, 2006. – 395 с.

14. ДСП-201-97 Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами), затверджені наказом МОЗ від 09.07.1997 року № 201.

15. Методичний посібник з розрахунку нормування та контролю викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря. [Електронний ресурс] : Режим доступу: medbib.in.ua

16. СОУ 60.3-30019801-011:2004. Компресорні станції. Контроль теплотехнічних та екологічних характеристик газоперекачувальних агрегатів.

17. Бурико Ю. Я. Образование окислов азота в неравновесном дифузионном турбулентном пламени / Ю. Я. Бурико, В. Р. Кузнецов // ФГВ. – 1983. – Т. 19, № 2. – С. 71–81.

18. Southwestern Pennsylvania Marcellus Shale Short-Term Ambient Air Sampling Report. Pennsylvania Department of Environmental Protection. November 2010.

19. Лернер М. О. Горение и экология / М. О. Лернер. – М. : МТП «Контекст», 1992. – 312 с.

20. Крылов Г. В. Роль природных и техногенных эмиссий газов в формировании парникового эффекта / Г. В. Крылов, Е. Е. Подборный,

С. Т. Фомина // Экология в газовой промышленности. – 1998. – № 2 – С. 22–23.

21. Ягода П. А. Побудова оптимальної моделі функції множинної регресії для визначення величин викидів NO_x , що утворюються в процесі роботи ГПА залежно від витрати паливного газу та коефіцієнта надлишку повітря / П. А. Ягода, В. І. Михайлів, В. В. Костів // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – № 2(23).

22. Сигал И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива / И. Я. Сигал. – Л. : Недра, 1988. – 312 с.

23. Steinzor N, Subra W, Sumi L. Investigating Links between Shale Gas Development and Health Impacts through a Community Survey Project in Pennsylvania New Solutions 2013; 23(1): 55-84.

24. Brook RD, Rajagopalan S, et al. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. Circulation. 2010; 121(21):2331–2378.

25. Wellenius GA, Burger MR, Coull BA, Schwartz J, Sus NH, Koutrakis P, Schlaug G, GoldDR, Mittleman MA. Ambient Air Pollution and the Risk of Acute Ischemic Stroke. Archives of Internal Medicine 2012; 172(3):229-34.

26. Семчук Я. М. Оцінка впливу компресорних станцій магістральних газопроводів на навколишнє середовище / Я. М. Семчук, Л. Б. Чабанович // Державний міжвідомчий науково-технічний збірник «Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ». – 1996. – Серія : Розробка та експлуатація нафтових і газових родовищ. Випуск 33. – С. 141–145.

27. Кярчес А. А. Транспорт природного газа: экологические аспекты / А. А. Кярчес, Н. Н. Петухова, С. А. Єфимочкин // Газовая промышленность. – 1999. – № 6. – С. 71–73.

28. Крижанівський Є. І. Вплив середовища та нерівномірності споживання газу на безаварійну експлуатацію газопроводу / Є. І. Крижанівський, О. С. Тараєвський, С. Й. Тараєвський // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів (Корозія-2008) : у 2-х томах

[спецвипуск журналу “Фізико-хімічна механіка матеріалів”] : IX міжн. конф.-вист., 10-12 черв. 2008 р.: збірник праць. – 2008. – Спец. вип. № 7. – С. 791–796.

29. Експрес-оцінка умов гільйотинного руйнування тривало експлуатованих газопроводів / О. М. Мандрик, Л. Є. Шкіца, Р. С. Грабовський [та ін.] // Наукові нотатки: міжвузівський збірник. – Луцьк : Луцьк. держ. техн. ун-т, 2013. – Вип. 40 (напряма “Інженерна механіка”). – С. 166–174.

30. Розгонюк В. В. Довідник працівника газотранспортного підприємства / Розгонюк В. В., Руднік А. А., Коломеєв В. М. – К. : Росток, 2001. – 1090 с.

31. Шишківський В. А. Діагностування технічного стану засобів проти-корозійного захисту та корозійного стану ГТС ДК «Укртрансгаз» / В. А. Шишківський, В. Б. Гаврильцев // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – № 4. – С. 48–51.

32. Говдяк Р. М. Кількісний аналіз аварійного ризику газотранспортних об’єктів підвищеної небезпеки. Практичні рекомендації / Р. М. Говдяк, Ю. М. Коснірев. – Львів : Кальварія, 2007. – С. 144–153.

33. Мандрик О. М. Екологічні та економічні наслідки аварійних ситуацій газотранспортних систем / О. М. Мандрик, Ю. Д. Михайлюк // Materials of the tenth International research and practice conference «Problems and perspectives of development of world science» (s.Donetsk, 15-17 February 2013) – Donetsk : «Tsyfrovaaya tipografia» Ltd, 2013. – P. 46–51.

34. КНД 211.2.3.014-95 «Інструкція про зміст та порядок складання звіту проведення інвентаризації викидів забруднюючих речовин на підприємстві», УкрНТЕК, 1995 р.

35. Терехов А. Л. Исследования и снижение шума на компрессорных станциях магистральных газопроводов / Терехов А. Л. – М. : ООО «ИРЦ Газпром», 2002. – 265 с.

36. Сова С. Г. Вплив вібро-шумового фактора на фізичну працездатність та стан вегетативної нервової системи у робітників вібронебезпечних професій. / С. Г. Сова, В. А. Шаповалова, В. М. Коршак // Лікарська справа. – 1999. – № 2. – С. 135-138.

37. Михайлюк Ю. Д. Дослідження характеристик шумового забруднення на компресорних станціях магістральних газопроводів / Ю. Д. Михайлюк // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування : науково-техн. журнал. – 2014.– № 2 (10).– С. 29– 36.

38. Звіт по інвентаризації викидів забруднюючих речовин КС-Богородчани Богородчанського лінійного виробничого управління магістральних газопроводів філії УМГ «Прикарпаттрансгаз» ПАТ «УКРТРАНСГАЗ», 2013. – 214 с.

39. КНД211.2.2.063-98. Метрологічне забезпечення. Відбір проб промислових викидів. Міністерство охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки України. – Київ, 1998.

40. Тищенко Н. Ф.Справочник «Охрана атмосферного воздуха. Расчет содержания вредных веществ различными предприятиями» / Н. Ф.Тищенко. – М. : Химия, 1991. – 353 с.

41. Промислова екологія : навч. посіб. / [С. О. Апостолук, В. С. Джигирей, А. С. Апостолук та ін.]. – К. : Знання, 2005. – 474 с.

42. Мороз А. С. Фізична та колоїдна хімія / А. С. Мороз, А. Г. Ковальова. – Львів : Світ, 1994. – 280 с.

43. Організація експлуатації газопроводів – Правила технічної експлуатації магістральних газопроводів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: forsa.com.ua

44. Деревинський Д. М. Пожежна небезпека об'єктів з наявністю газового горючого середовища та нагрітих технологічних поверхонь у замкненому просторі / Д. М. Деревинський // Проблемы пожарной безопасности. Сборник научных трудов. – 2010. – Выпуск 27. – С. 60 – 65.

45. НАОП 1.1.23-1.05-81 Правила технической эксплуатации компрессорных цехов с электрическим приводом.

46. Микаэлян Э. А. Оценка надежности газотурбинного оборудования компрессорных станций газопроводов / Э. А. Микаэлян // Промышленный сервис. – 2011. – № 2. – С. 28–35.

47. Шмигірівський П. П. Науково-технічна нарада «Протипожежний захист ГПА та їх укриття на КС магістральних газопроводів» / П. П. Шмигірівський, О. В. Жук // Інформаційний огляд ДК «Укртрансгаз». – 2004. – № 2 (26). – С.15–17.

48. Тагієв Р. М. Совершенствование противопожарной защиты объектов ОАО «Газпром» / Р. М. Тагієв // Газовая промышленность. – 2005. – № 1. – С.59–63.

49. Пустынников С. С. Противопожарная защита компрессорных станций магистральных газопроводов / С. С. Пустынников // Обзорная информация. Серия: Техника безопасности и охрана труда. Выпуск 4. – М. : ВНИИЭгазпром, 1985. – 36 с.

50. Губський А. І. Цивільна оборона / Губський А. І. – К. : Міністерство освіти, 1995. – 216 с.

51. Технические требования по реконструкции установок пожаротушения для газоперекачивающих агрегатов, размещенных в индивидуальных укрытиях емк. от 3000 до 7000 м³. Утв. Нач. ВНИИПО МВД РФ 06.07.2000. – М., 2000. – 20 с.

52. Ревазов А. М. Анализ аварийности на компрессорных станциях магистральных газопроводов / А. М. Ревазов, И. А. Леонович // Труды РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина. – 2014. – № 2 (275). – С. 26–33.

53. Фик А. С. Анализ повреждений технологических трубопроводов компрессорных станций / А. С. Фик, П. С. Кунина, А. В. Бунякин // Современные проблемы науки и образования. – 2007. – № 4. – С. 118-123.

54. Мандрик О. М. Розвиток наукових основ підвищення рівня екологічної безпеки при транспортуванні природного газу: дис. ... доктора техн. наук : спец. 21.06.01 / Мандрик Олег Миколайович. – Івано-Франківськ, 2013. – 336 с.

55. Бутусов О. Б. Компьютерное моделирование нестационарных потоков в сложных трубопроводах / О. Б. Бутусов, В. П. Мешалкин. – М. : ФИЗМАТГИЗ, 2005. – 550 с.

56. Мандрик О. М. Моделювання екологічного ризику надзвичайної ситуації при аварії на газотранспортному вузлі (на прикладі Богородчанського району) / О. М. Мандрик, Ю. Д. Михайлюк // Міжнародна наук.-практична конф. «Наука і техніка: виклики сьогодення» (Київ, 8-9 лютого 2013 р.): тези доповіді. – К. : Науково-технічне об'єднання «Потенціал», 2013. – С. 40–44.

57. Ангалев А. М. Исследования вибрации и пульсации газа в системах «центробежный нагнетатель трубопровод» / А. М. Ангалев, Л. И. Соколинский, А. С. Лопатин // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И. М. Губкина. – 2009. – № 4. – С.74– 85.

58. Тарасов В. М. Эксплуатация компрессорных установок [Текст] : производственное издание / В. М. Тарасов. – Москва : Машиностроение, 1987. – 136 с.

59. Говдяк Р. М. Проблемы и пути повышения экологической безопасности компрессорных станций газопроводов / Р. М. Говдяк // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2004. – № 6. – С. 44–50.

60. У Болгарії стався вибух на газовій компресорній станції. Режим доступу: http://www.ukrinform.ua/ukr/news/u_bolgariiii_stavsya_vibuh_na_gazoviy_kompresorniy_stantsiii_1837077

61. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Пер. с англ. / Под. ред. Ю. А. Кошмарова, В. Е. Макарова. – М. : Стройиздат, 1990. – 424 с.

62. Диагностическое обслуживание магистральных газопроводов: Учебное пособие / [Ангалев А. М., Антипов Б. Н., Зарицкий С. П., Лопатин А. С.]. – М. : МАКС Пресс, 2009. – 112 с.

63. Правила технічної експлуатації магістральних газопроводів. Режим доступу: http://forca.com.ua/knigi/pravila/pravila-tehnicnoi-ekspluatacii-magistralnih-gazoprovodiv_5.html

64. Технічна енциклопедія. Робота – компресорна установка. Режим доступу: <http://techtrend.com.ua/index.php?newsid>

65. Вибух компресорної станції на Харківщині. Режим доступу: <http://tsn.ua/ukrayina/na-harkivschini-vibuhnula-kompresorna-stanciya-ye-postrazhdali.html>

66. Мандрик О. М. Визначення збитків від аварійних ситуацій на об'єктах газотранспортної інфраструктури / О. М. Мандрик, Ю. Д. Михайлюк // Міжнародна наук.-практична конф. «Природокористування і сталий розвиток: економіка, екологія, управління» (Ірпінь, 10-11 квітня 2014 р.) : тези доповіді. – Ірпінь : Видавництво Національного університету ДПС України, 2014. – С. 65–67.

67. Мандрик О. М. Комплексна екологічна оцінка впливу газотранспортної інфраструктури на довкілля з використанням геоінформаційних систем / О. М. Мандрик, Ю. Д. Михайлюк // Всеукраїнська наук.-практична конф. молодих учених та студентів «Екологічна безпека держави» (Київ, 15-17 квітня 2014 р. Національний авіаційний університет) : тези доповіді. – К. : НАУ, 2014. – С. 22–23.

68. Мандрик О. М. Екологічний ризик виникнення аварій на магістральних газопроводах / О. М. Мандрик, Ю. Д. Михайлюк // Міжнародна науково-технічна конференція «Нафтогазова освіта та наука: стан та перспективи» (10-12 грудня 2014 р.) : тези доповіді. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2014. – С. 345–347.

69. Христич В. А. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды / В. А. Христич, А. Г. Тумановский. – К. : Техника, 1983. – 144 с.

70. Создание малотоксичных камер сгорания / Г. Н. Любчик, Г. Б. Варламов, Р. М. Говдяк [и др.] // Экотехнологии и ресурсосбережение.– 2003. – № 2. – С. 65–74.

71. Risk N. K., Mongia H.C. Rich – lean combustion gives very low NO_x // Mod. Power System. – 1990. 10, №- P.83–87.

72. Сігал І. Я. Оксиди азоту в продуктах згорання та їх перетворення в атмосфері / І. Я. Сігал. / Київ : Наукова думка, 1987. – 144 с.

73. Тумановський А. Г. Зниження викидів NO та вуглеводнів на пускових і змінних режимах енергетичних ГТУ при згоранні рідких та газоподібних палив / А. Г. Тумановський, М. Н. Гутник, К. Ю. Соколов // Електричні станції. – 1991. – № 11. – С. 2–6.

74. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / А. Лефевр; пер. с англ. – М. : Мир, 1986. – 566 с.

75. Leonard G., Correa S.M. NO_x formation in premixed high – pressure lean methane flame // ASME/ PD Vol. 30, Sing, S.N. ED., 1990. – P. 69–74.

76. Correa S.M. NO_x formation in lean premixed methane flames // Engineering systems laboratory (USA). Report 90CRD021, 1990. – 16 p.

77. Програма и основные результаты комплексных испытаний газомазутного котла блока 250/300 МВт ТЭЦ – 5 Киевэнерго / С. Д. Сердюк, Н. П. Даниленко, Г. Н. Любчик [и др.] // Энергетика, электрификация. – 1998. – № 1. – С. 43–47.

78. Маркушин А. М. Модернизация камер сгорания традиционных схем / А. М. Маркушин, А. М. Постненков, В. П. Савченко // Газовая промышленность. – 1999. – № 2. – С. 52–65.

79. Любчик Г. Н. Проблемы применения каталитической технологии в камерах сгорания ГТУ / Г. Н. Любчик, Г. С. Марченко, Б. И. Шелковский // В зб. наукових праць «Нафта і газ України». Матеріали 6-ї Міжнародної конференції «Нафта і газ України – 2000». – Івано-Франківськ, 31 жовтня – 3 листопада, 2000.– Т. 3.– С. 337–338.

80. Wilkes C., Mongia H.C., Santanam C.B. An ultra – low NO_x combustion system for a 3,5 MW industrial gas turbine. // ASME Pap. – 1990 №GT – 83. P.1-7.

81. Кашапов Р. С. Концепция создания малоэмиссионной камеры сгорания / Р. С. Кашапов // Газотурбинные технологии. – 2000. – № 4. – С. 16 – 19.

82. Мостіпаненко, Г. Б. Вдосконалення характеристик камери згорання газотурбінного двигуна з використанням методів тривимірного моделювання [Електронний ресурс] / Г. Б. Мостіпаненко, С. І. Сербін // Електронне видання

«Вісник Національного університету кораблебудування». – Миколаїв : Видавництво НУК, 2010. – № 1. – Режим доступу: <http://ev.nuos.edu.ua>

83. Горбійчук М. І. Математичні моделі прогнозування викидів компресорними станціями шкідливих речовин в атмосферу [Електронний ресурс] / М. І. Горбійчук, І. В. Щупак // Автоматика/ Automatics–2011, 28-30 вересні 2011 року. – Львів, Україна, 2011. – С. 84–85. – Режим доступу: ena.ip.edu.ua

84. Горбійчук М. І. Метод синтезу емпіричних моделей на засадах генетичних алгоритмів / М. І. Горбійчук, О. І. Когутяк, І. В. Щупак // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2009. – № 4 (33). – С. 72–74.

85. Вплив факторів роботи газоперекачувальних агрегатів на час їх напрацювання / М. І. Горбійчук, Б. В. Копей, А. Беллауар [та ін.] // Нафтова енергетика. Всеукраїнський науково-технічний журнал. – 2008. – № 3 (8). – С.55–58.

86. Геоекологічна оцінка впливу магістральних газопроводів на долинні екосистеми передкарпаття / О. М. Адаменко, Я. О. Адаменко, Л. Є. Шкіца [та ін.] // Прикарпатський вісник НТШ. – 2012. – № 1(17). Нафтогазова справа. – С. 278–285.

87. Горнюкова А. А. Экологические проблемы газовой промышленности / А. А. Горнюкова, Д. В. Галунова // Известия Тульского ГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 11. (Ч.2). – С. 292–296.

88. Говдяк Р. М. Шляхи підвищення енерго-екологічної безпеки та ефективності роботи магістральних газопроводів України [Електронний ресурс] / Р. М. Говдяк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2012. – № 1(42) – Режим доступу: <http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmggr>

89. Кашапов Р. С. Разработка динамической модели камеры сгорания с предварительным смешением топлива / Р. С. Кашапов, Д. А. Максимов, Д. В. Скиба // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2002. – Выпуск № 2. – С. 52–59.

90. Герасименко В. П. Вибрационное горение в камерах сгорания ГТД / В. П. Герасименко, Н. Б. Налесный // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2006. – № 5. – С. 53–58.

91. Иноземцев А. А. Технология малоэмиссионного горения RQQL как направление в достижении высокой надежности стационарного газотурбинного двигателя [Электронный ресурс] / А. А. Иноземцев, В. В. Токарев // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2002. – № 2. Режим доступа: [http://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-maloemissionnogo-goreniya-rqqk-napravlenie-v-dostizhenii-vysokoy-nadezhnosti-statsionarnogo-gazoturbinnogo#ixzz43iHjT5N7](http://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-maloemissionnogo-goreniya-rqqk-napravlenie-v-dostizhenii-vysokoy-nadezhnosti-statsionarnogo-gazoturbinnogo)

92. Разработка систем низкоэмиссионного горения топлива в газотурбинных установках / В. Н. Лавров, А. М. Постников, Ю. И. Цыбизов [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2007. – № 2. – С. 118–127.

93. Варламов Г. Б. Фактические характеристики оборудования компрессорных станций и оптимизация загрузки магистрального газопровода / Г. Б. Варламов, Е. А. Приймак // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 5/8 (65). – С. 9–13.

94. Варламов Г. Б. Комплексні дослідження енергоекологічних показників експлуатації ГТУ у складі ГПА типу ГТК-10 / Г. Б. Варламов, П. О. Позняков, Д. М. Юрашев // Енегросбереження. – 2012. – № 01(95). – С.15–24.

95. Любчик Г. Н. Результаты испытаний камеры сгорания гтд дг 80 с низко-эмиссионным горелочным устройством на базе трубчатых модулей / Г. Н. Любчик // Современные технологии в газотурбостроении. – 2009. – № 4/6 (40) Часть III. – С. 13–18.

96. Лещенко І. Ч. Впровадження сучасних технологій у газотранспортній системі України для зменшення викидів шкідливих речовин в

атмосферу [Електронний ресурс] / І. Ч. Лещенко // Проблеми загальної енергетики. – 2010. – Вип.3 (23). – Режим доступу:

http://nbuv.gov.ua/UJRN/PZE_2010_3_10irbis-nbuv.gov.ua

97. Левченко О. В. Викид токсичних речовин в атмосферу з газотурбінних установок / О. В. Левченко // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – № 1. – С. 61–63.

98. Левченко О. В. Очищення вихлопних газів від оксидів вуглецю / О. В. Левченко // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – № 6. – С. 62–66.

99. Nitrogen Oxides Control Technology Fact Book, Leslie L. Sloss, Noyes Data Corp., 1992.

100. Кибарин А. А. К вопросу влияния технического состояния ГПА на загрязнение воздушного бассейна в районе компрессорных станций магистральных газопроводов / А. А. Кибарин, А. С. Касимов, Т. В. Ходанова // Вестник АИЕС, Алма-Аты. – 2009. – № 2. – С. 72–76.

101. Середюк М. Д. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів: Підручник / Середюк М. Д., Якимів Й. В., Лісафін В. П. – Івано-Франківськ, 2001. – 517 с.

102. Михайлюк Ю. Д. Компресорні станції магистральних газопроводів як екологічно-небезпечні об'єкти / Ю. Д. Михайлюк // X Всеукраїнська наукова конференція студентів, магістрів та аспірантів «Сучасні проблеми екології та геотехнологій» (Житомир, 10-12 квітня 2013): тези доповіді. – Житомир : ЖДЕУ, 2013. – С. 88.

103. Єремін Н. В. Компресорні станції магистральних газопроводів (надійність і якість). / Єремін Н. В., Степанов О. А., Яковлев Є. І. – СПб. : Недра, 1995. – 336 с.

104. Department of Transportation. Pipeline Safety: Safety of Gas Transmission Pipelines. Advanced Notice of Proposed Rulemaking. Federal Register. August 25, 2011, Vol. 76, 165.

105. Михайлюк Ю. Д. Механізм і фактори утворення оксидів нітрогену і карбону при згоранні природних газів / Ю. Д. Михайлюк // Наукові нотатки.

Міжвузівський збірник (за галузями знань «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство»). Вип. 44. – Луцьк : Луцький НТУ, 2014. – С. 179–183.

106. Михайлюк Ю. Д. Характеристика джерел утворення забруднюючих речовин Богородчанського ЛВУМГ / Ю. Д. Михайлюк // Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць. Вип. 24.8. – Львів : РВВ НЛТУ України, 2014. – С. 125–131.

107. СТО Газпром 2-3-5-03902005. Каталог удельных выбросов вредных веществ газотурбинных газоперекачивающих агрегатов.[Электронный ресурс]. Режим доступа :[http://www. Complexdoc .ru/ ntdpdf /540976/ katalog_ ugelnykh_vybrosov_vrednykh_veshchestv_gazoturbinykh_gazoperekachiv.pdf](http://www.Complexdoc.ru/ntdpdf/540976/katalog_ugelnykh_vybrosov_vrednykh_veshchestv_gazoturbinykh_gazoperekachiv.pdf).

108. Ахмедов Р. Б. Перспективные экологические безопасные технологии сжигания органических топлив и горючих отходов с эффективным улавливанием и полезным использованием CO₂ / Р. Б. Ахмедов, Э. Р. Ахмедов // Первый Московский международный форум «Энергетика и общество», 23-25 июня. – М. : Изд.ГазОйл Пресс, 1988 – Специализированный выпуск № 22. – С. 288–294.

109. Gas Reburning for High Efficiency NO_x Control Boiler Durability Assessment, B. A. Folsom, T. Sommer, D. Engelhardt, and S. Freedman, 96-RP139.04, Air & Waste Management Assn.

110. Рудаченко А. В. Газотурбинные установки для транспорта природного газа / А. В. Рудаченко, Н. В. Чухарева. – Томск : Изд-во томского политехнического университета, 2010. – 217 с.

111. Кибарин А. А. Повышение экологической безопасности газоперекачивающих компрессорных станций за счет модернизации ГПА / А. А. Кибарин, Т. В. Ходанова // Современные наукоемкие технологии. – 2009. – № 11. – С. 35–37.

112. Екологія. Словник екологічних термінів і понять для студентів вищих навчальних закладів України. – К. : Манускрипт, 2000. – 232 с.

113. Ярошенко О. Г. Хімія : Підручн. для 10 кл. загальноосвіт. навч. закл. (рівень стандарту, академічний рівень) / О. Г. Ярошенко. – К. : Грамота, 2010. – 224 с.
114. Біосфера. Екологія. Охрана природы: справочное пособие / Сытник К. М., Брайон А. В., Гордецкий А. В., Брайон А. П. – К. : Наукова думка, 1994. – 667 с.
115. Карп І. Н. Продукти згорання природного газу при високих температурах. / Карп І. Н., Сорока Б. С., Дашевський Л. Н. – Київ : Техніка, 1967. – 382 с.
116. Гомонай В. І. Фізична хімія : Підручник / В. І. Гомонай, О. В. Гомонай. – Ужгород : ВАТ «Патент», 2004. – 712 с.
117. Зимон А. Д. Колоидная химия. Учебное пособие для вузов / А. Д. Зимон, Н. Ф. Лещенко. – М. : АНАР, 2001. – 320 с.
118. Серета І. П. Хімія : Основні закони і рівняння / Серета І. П. – К. : Либідь, 1994. – 80 с.
119. Зельдович Я. Б. Окислення азоту при згоранні / Зельдович Я. Б., Садовніков П. Я., Франк-Каменецький Д. А. – М. : Наука, 1987. – 146 с.
120. Бочков М. В. Утворення оксидів азоту NO при розповсюдженні ламінарного полум'я по гомогенній метаноповітряній суміші. / Бочков М. В., Ловачев С. Н., Хвисевич Б. Н. – М.: Вид-во ІММ РАН, 1996. – 98 с.
121. Степанов Д. В. Котельні установки промислових підприємств [Текст] : навч. посіб. / Степанов Д. В., Корженко Є. С., Боднар Л. А. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 119 с.
122. Соколов В. А. Методы анализа газов / Соколов В. А. – Москва, 1958. – 374 с.
123. Газоаналізатор Testo-350. [Електронний ресурс]. Режим доступу: www.ekoet.ru
124. Держспоживстандарт України. Наказ № 218 від 22.08.2005. Положення про державний реєстр засобів вимірювальної техніки. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: zakon5.rada.gov.ua

125. Концепція (проект) державної науково-технічної програми «створення промислових газотурбінних двигунів нового покоління для газової промисловості та енергетики» / Б. Патон, А. Халатов, Д. Костенко [та ін.] // Вісн. НАН України, 2008. – № 4. – С. 3–9.

126. Романовський Г. Ф. Камери згорання суднових газотурбінних двигунів: навчальний посібник / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін. – Миколаїв : УДМУ, 2000. – 259 с. – ISBN 5-87848-019-0.

127. Постников А. М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ / Постников А. М.; под ред. д.т.н., проф. Гриценко Е. А. – Самара : Изд-во Самарского научного центра РАН, 2002. – 286 с. – ISBN 5.93424-081-1.

128. Willis J.D. Industrial RB211 DLE Gas Turbine Combustion Update / Willis J.D., Moran A.J. // ASME, 2000. – GT2000-109. – 6 p.

129. NO_x Emissions Reduction in an Innovative Industrial Gas Turbine Combustor (GE10 Machine): A Numerical Study of the Benefits of a New Pilot System of Flame Structure and Emissions / [A. Andreini, V. Facchini, L. Mangani A. Asti, G. Ceccherini, R. Modi] // ASME, 2005. – GT2005-68364. – 13 p.

130. Теплотехника / [Швец И. Т., Толубинский В. И., Алабовский А. Н. и др.]. – К. : Издательское объединение «Вища школа», 1976. – 520 с.

131. Режимы газотранспортных систем / [Яковлев Е. И., Козак О. С., Михалків В. Б. та ін.]. – Львів : Світ, 1992. – 170 с.

132. Мандрик О. М. Багатофакторний аналіз комплексного еколого-технічного обстеження газоперекачувального агрегату на різних технологічних режимах роботи / О. М. Мандрик, В. В. Тирлич, Ю. Д. Михайлюк // Нафтогазова енергетика. Вип. 2(24). – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2015. – С. 44–52.

133. ГОСТ 20440-75. Установки газотурбинные. Методы испытаний. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: vsegost.com/Catalog/82/8249.shtml

134. ГОСТ 28775-90. Агрегаты газоперекачивающие с газотурбинным приводом. Общие технические условия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: vsegost.com/Catalog/10/10692.shtml)

135. Степанишин В. М. Побудова моделі кореляційного аналізу для дослідження багатофакторних процесів і явищ [Електронний ресурс] / В. М. Степанишин, Л. О. Тисовський // Національний університет «Львівська політехніка», кафедра ОП Національного лісотехнічного університету України. Режим доступу: <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/15993>

136. Смагин Д. М. Многофакторный регрессионный анализ с помощью MS EXSEL / Д. М. Смагин, Т. В. Горловец // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2012. – Випуск 6/(77). – С. 39–42.

137. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий, ОНД–86. – Л. : Гидрометеоздат, 1987.– 94 с.

138. Пат. 96170 Україна, МПК G01N 21/94 (2006.01). Пристрій для контролю забруднення повітря твердими частинками / Михайлюк Ю. Д.; заявник і патентовласник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № u201403112 ; подано 27.03.2014 ; опубл. 26.01.2015, Бюл. № 2.

139. Пат. 93599 Україна, МПК G01N 21/94 (2006.01). Пристрій для контролю концентрації твердих частинок у повітрі / Михайлюк Ю. Д.; заявник і патентовласник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № u201404201; подано 18.04.2014 ; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 19.

140. Air pollution / Barker K , Kambi F , Catcott J – Geneva World health organizations, 1982. – с. 369.

141. Атрощенко В. И. Технологія связанного азота / Атрощенко В. И. – Харьков : Изд ХГУ, 1962 – с. 62–75.

142. Спосіб очищення відхідних газів котельних від оксиду вуглецю та пристрій для його реалізації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=56670&chapter=description>

143. Пат. 102157 Україна, МПК B01J 38/00 C10K 1/00 (2015.01). Спосіб очистки відхідних газів компресорних установок від СО / Михайлюк Ю. Д.;

заявник і патентовласник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № u201413739; подано 22.12.2014; опубл. 26.10.2015, Бюл. № 20.

144. Реконструкція компресорних станцій газотранспортної системи України з використанням газотурбінних та електропривідних газоперекачувальних агрегатів / А. А. Халатов, Д. А. Костенко, Д. П. Парафійник [та ін.] // Нафтова і газова промисловість. – 2010. – № 1. – С. 30–32.

145. Говдяк Р. М. Зниження шкідливого впливу роботи компресорних станцій / Р. М. Говдяк, Р. Я. Шимко // Трубопровідний транспорт. – 2012. – № 3(75). – С. 20–23.

МІСЦЕ -