

## ПОБУДОВА ОПТИМАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ФУНКЦІЇ МНОЖИННОЇ РЕГРЕСІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИН ВИКИДІВ $NO_x$ , ЩО УТВОРЮЮТЬСЯ У ПРОЦЕСІ РОБОТИ ГПА ЗАЛЕЖНО ВІД ВИТРАТИ ПАЛИВНОГО ГАЗУ ТА КОЕФІЦІЄНТА НАДЛИШКУ ПОВІТРЯ

<sup>1</sup>П.А.Ягода, <sup>2</sup>В.І.Михайлів, <sup>2</sup>В.В.Костів

<sup>1</sup> УМГ "Черкаситрансгаз", м. Черкаси, вул. Сумгайтська, 3, тел. (0472) 360750,  
e-mail: pyagoda.ctg@nafnjgas.net

<sup>2</sup> ІФНТУНГ, 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42141  
e-mail: etech@nung.edu.ua

*Для исследования зависимости между параметром величины выбросов  $NO_x$  коэффициентом избытка воздуха и расходом топливного газа был проведен регрессионный анализ выбросов  $NO_x$ . Произведен расчет коэффициентов корреляции и значения стандартной ошибки, записаны уравнения множественной регрессии. Выбрана оптимальная модель функции множественной регрессии для определения и прогнозирования величины выбросов  $NO_x$ , образующихся в процессе работы ГПА*

*For research of dependence between parameter of size of emissions  $NO_x$  surplus of air factor and the charge of fuel gas regression analysis was carried out. Factors of correlation, value of a standard mistake are calculated, the equations of plural regress are written down. Optimal model of function of plural regress for definition and forecasting of size of emissions  $NO_x$  which are formed during work gas turbine are chosen*

В наш час все більша увага приділяється питанню забруднення навколишнього середовища і, особливо, атмосферного повітря. Розвиток транспорту та енергетики, спалювання відходів, великі об'єми транспорту газу призводять до появи в атмосфері великих міст і промислових центрів мікроконцентрації продуктів повного згоряння палива (двоокису сірки ( $SO_2$ ), двоокису вуглецю ( $CO_2$ )), компонентів неповного згоряння палива (оксиду вуглецю ( $CO$ )), оксидів азоту ( $NO_x$ ), вуглеводів та інших речовин, які утворюють при фотохімічних реакціях смоги. Це призводить до випадання кислотних дощів і наносить великої шкоди здоров'ю населення регіонів та негативно впливає на рослинний і тваринний світ. Крім того, проходить процес постійного переносу атмосферного повітря на великі відстані від джерел забруднення, що робить проблему забруднення глобальною.

Як правило, до забруднювачів повітря відносяться речовини, які можуть виявити негативний вплив на людину і навколишнє середовище. Більшість з таких речовин, зазвичай, присутні в атмосфері в низьких (фонових) концентраціях і не є небезпечними. Вони можуть утворюватись як в результаті різноманітних природних процесів, так і з антропогенних джерел.

Необхідною передумовою створення екологічно-чистого навколишнього середовища регіонів, де розміщені компресорні станції (КС), є аналіз забруднення атмосферного повітря газоперекачуючими агрегатами (ГПА), джерел та особливостей утворення шкідливих речовин (ШР) під час роботи КС. Це питання є надзвичайно актуальним для нашого суспільства.

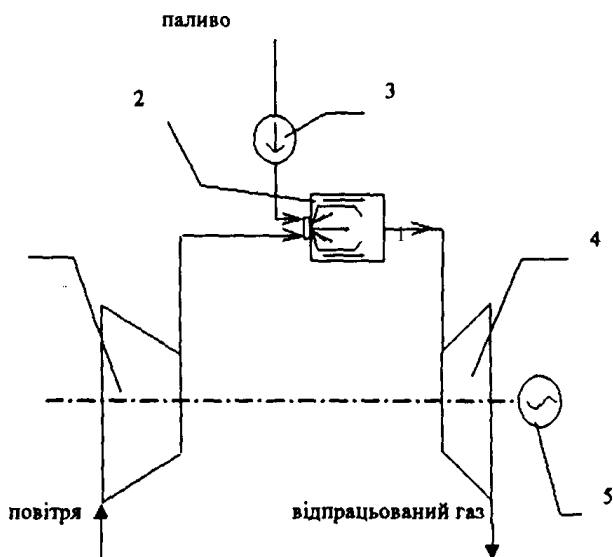
Основними компонентами викидів, концентрацію яких необхідно контролювати на виході з ГПА, є кисень ( $O_2$ ), двоокис вуглецю ( $CO_2$ ), двоокис азоту ( $NO_2$ ), окис азоту ( $NO$ ), окис вуглецю ( $CO$ ), двоокис сірки ( $SO_2$ ). Понаднормова зміна концентрації цих компонентів вказує на відхилення роботи агрегату від ефективних режимів експлуатації та появу дефектів обладнання, збільшення еколого-небезпечних викидів та неефективності використання палива, що обумовлює зниження ККД установки, і, як наслідок, економічні і екологічні збитки.

Проаналізуємо робочий процес ГПА і хімічні процеси, що відбуваються при згоранні газового палива під час роботи ГПА.

Найпростіший ГПА функціонує наступним чином (рис. 1).

Атмосферне повітря, пройшовши систему фільтрів, надходить на вхід осьового компресора 1. Після стиснення, повітря під тиском 0,5-0,7 МПа за температури 180-240°C надходить в камеру згоряння (КЗ) 2, де воно розділяється на два потоки. Менша частина повітря безпосередньо приймає участь в процесі горіння підведеного ззовні палива за допомогою паливного насоса 3 палива, а більша ж його частина, пройшовши між корпусом КЗ і жаровою трубою, яка слугує для оптимізації процесу згорання палива, охолоджує останню і, після змішування з продуктами згорання в кінці КЗ, зменшує температуру газів до восьмої величини, яка обумовлена жаростійкістю лопаток і дисків газової турбіни 4 (700-850°C в стаціонарних ГПА). З камери згоряння 2 газ надходить в турбіну 4, яка слугує для перетворення його потенціальної енергії в механічну роботу. Ви-

конавши роботу, газ охолоджується і його тиск зменшується до атмосферного. Із газової турбіни відпрацьований газ викидається в навколишнє середовище при температурі 400-450°C. Природно, що процес утворення ШР проходить в КЗ. Інші ж елементи ГПА слугують для підготовки паливо-повітряної суміші перед подачею її в КЗ, для організації роботи агрегату в цілому і для виконання ним корисної роботи.



1) компресор; 2) камера згоряння;  
3) паливний насос; 4) газова турбіна;  
5) споживач потужності (компресор)

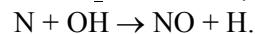
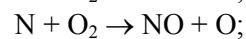
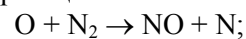
Рисунок 1 — Схема газотурбінної установки

Горіння палива в КЗ 2 проходить в суміші з повітрям і під великим тиском. При цьому проходять хімічні реакції окислення компонентів палива, яке згоряє. Із всіх складників повітря, тільки кисень ( $O_2$ ) приймає участь в процесі горіння. Його концентрація в повітрі за нормальних умов складає приблизно 21% об'єму або 23,5% маси. При зменшенні концентрації кисню нижче 12-15% горіння може припинитись. Отже, змінюючи концентрацію  $O_2$ , можна змінювати швидкість процесу.

У процесі транспортування природного газу магістральними газопроводами експлуатуються значна кількість газоперекачувальних агрегатів із газотурбінними приводами. Основними характеристиками двигунів є їх потужність, економічність та екологічність. Особливо актуальним останнім часом постає питання щодо екологічних показників роботи газотранспортної системи. Основним джерелом шкідливих речовин, які поступають в атмосферу в процесі функціонування об'єктів транспортування газу, є продукти згоряння. Надзвичайно важливими з точки зору екології, крім оксидів вуглецю, є також і окисли азоту  $NO$  та  $NO_2$ . Таким чином, питання зменшення викидів окислів азоту постає ключовою проблемою горіння та екології. Для знаходження нових шляхів зменшення викидів окислів необхідно чітко уявляти механізми їх утворення.

На даний час відомі чотири способи утворення  $NO_x$  в процесі горіння, кожен з яких залежно від властивостей палива, облаштування камери згоряння тощо, є вагомим. Це: термічний шлях (або механізм Зельдовича), «швидке» утворення  $NO_x$  (механізм Фенімора), утворення окислів через  $N_2O$  й утворення окислів з паливного азоту.

Суть механізму Зельдовича полягає в протіканні таких реакцій:



Механізм є термічним, оскільки перша з наведених реакцій має дуже високу енергію активації (міжмолекулярний зв'язок в молекулі азоту надзвичайно сильний); швидкість реакції залежить від концентрації реагентів та температури.

Таким чином, основним параметром процесу горіння, відповідальним за утворення  $NO_x$  є коефіцієнт надлишку окислювача. Одночасно на початковій ділянці факела утворюються так звані «швидкі»  $NO_x$ , в складному процесі утворення яких беруть участь радикали  $CH$ .

Отже, враховуючи, що на процес горіння впливають такі чинники:

- повітря: його температура, тиск, вологість;
- паливо: його теплотворна здатність, температура, в'язкість, густина, коливання тиску;
- забруднення: горілок, камер згорання;
- механіка: гістерезис в механічних з'єднаннях (люфти),

доцільно дослідити вплив основних факторів на утворення  $NO_x$  в процесі роботи газоперекачувального агрегату.

Виходячи з необхідності кількісного виміру щільності, визначення напрямку зв'язку, а також встановлення аналітичного виразу залежності результату від конкретних факторів, за незмінності решти діючих факторних ознак, скористаємось методами кореляційно-регресійного аналізу.

На основі даних натуральних замірів димових газів та відповідних технологічних параметрів роботи ГПА ГТК-10-і (таблиця 1) виберемо для аналізу величини витрати паливного газу та коефіцієнта надлишку повітря (факторні ознаки) та величину викиду  $NO_x$  (результативна ознака) і побудуємо множинну регресію.

Факторні ознаки вибрані як основні, після аналізу їх впливу на результативну ознаку та вивчення щільності зв'язку.

Для опису форми зв'язку між параметрами як конкурентні вибрані лінійна та степенева регресійна моделі. Параметри рівняння множинної регресії  $a_1, a_2, \dots, a_m$  (коефіцієнти множинної регресії) визначені за допомогою методу найменших квадратів.

Множинний коефіцієнт кореляції розраховано за формулою

Таблиця 1 – Результати натуральних замірів

Таблиця 2 – Результати розрахунків

NOx, кг/доба	Розх.пал.газу, м <sup>3</sup> /доба	Коеф.надлишку повітря, (λ)	NOx, кг/доба (ln NOx)	Розх.пал.газу, м <sup>3</sup> /доба (ln Qпг)	Коеф.надлишку повітря (λ) (ln λ)
177	65 520	5,22	4,22		
185	65 520	5,17615	5,17615	11,09011	1,652497
182	65 520	5,230356	5,230356	11,09011	1,652497
191	67 800	5,204007	5,204007	11,09011	1,652497
192	67 800	5,252273	5,252273	11,12432	1,656321
215	67 800	5,257495	5,257495	11,12432	1,652497
192	71 064	5,370638	5,370638	11,12432	1,652497
201	71 064	5,297495	5,297495	11,17134	1,611436
218	71 064	5,409305	5,409305	11,17134	1,587192
218	71 064	5,404495	5,404495	11,17134	1,595339
196	74 592	5,278115	5,278115	11,21979	1,560248
204	74 592	5,31312	5,31312	11,21979	1,553925
214	74 592	5,263976	5,263976	11,21979	1,549688
221	78 144	5,398163	5,398163	11,26631	1,515127
215	78 144	5,370638	5,370638	11,26631	1,504077
231	78 144	5,412418	5,412418	11,26631	1,501853
232	83 736	5,248737	5,248737	11,33542	1,467874
283	83 736	5,44447	5,44447	11,33542	1,460938
287	83 736	5,459482	5,459482	11,33542	1,453953
287	83 736	5,468051	5,468051	11,33542	1,451614
318	83 736	5,433389	5,433389	11,33542	1,453953
253	83 736	5,483496	5,483496	11,33542	1,458615
266	83 736	5,46452	5,46452	11,33542	1,458615
261	83 736	5,616771	5,616771	11,33542	1,456287
275	83 736	5,641907	5,641907	11,33542	1,453953
282	83 736	5,655992	5,655992	11,33542	1,451614
286	83 736	5,652489	5,652489	11,33542	1,458615
285	83 736	4,27	4,27		

Побудуємо графічну оцінку лінійної функції регресії (рис. 2).

Скоригований коефіцієнт детермінації збільшився майже на 2%, проте помилка прогнозування зменшилась майже в 300 разів. Отримали модель визначення викидів забруднюючої величини NOx залежно від зміни розходу паливного газу та коефіцієнту надлишку повітря λ :

$$\ln(\text{NOx}) = -12,0408 - 0,1015 \cdot \ln(\lambda) + 1,5685 \cdot \ln(\text{Qпг})$$

Отримане рівняння дає змогу із великою точністю визначати обсяги величини викидів окислів азоту на основі відомих параметрів витрати паливного газу та коефіцієнту надлишку повітря. Рівняння дозволяє, не проводячи постійні виміри викидів NOx, давати їх кількісну оцінку лише за даними, що фіксуються автоматичною системою управління агрегатом. Крім того, перевага методу полягає в можливості коректно визначати шукані величини на змінних режимах роботи ГПА на відміну від визначеного натуральним виміром обсягу для стаціонарного режиму.

Задача визначення величини шкідливих викидів без проведення постійних трудомістких замірів у край необхідна для подальшого аналізу роботи газотранспортної системи в плані її екологічної безпеки.

$$R_{yx1x2} = \sqrt{\frac{\delta_{yx1x2}^2}{\sigma_y^2}}$$

де:  $\delta_{yx1x2}^2$  – дисперсія результативної ознаки, розрахована по регресійному рівнянню,  $\sigma_y^2$  – загальна дисперсія результативної ознаки.

Рівняння регресії визначення викидів забруднюючої величини NOx залежно від зміни витрат паливного газу Qпг та коефіцієнта надлишку повітря λ матиме вигляд

$$\text{NOx} = -754,3357 + 67,7218 \cdot \lambda + 0,0088 \cdot \text{Qпг}$$

Побудована регресія пояснює 79.9% варіації залежної величини NOx (коефіцієнт кореляції R (NOx/λQпг) дорівнює 0,89) – це досить хороший результат.

Проаналізуємо аналогічну модель, але взявши за результативні та факторні ознаки логарифми величин NOx, Qпг, λ . Результати розрахунків наведені в таблиці 2.

Побудуємо тримірну діаграму розсіювання цих змінних (рис. 1).

Характер діаграми дає змогу припустити наявність лінійної залежності вигляду

$$\ln z = \beta_0 + \beta_1 \ln x + \beta_2 \ln y.$$

множинний  
 $R(\text{NO}_x/\text{Lambda}/Q \text{ пр}) = ,902;$   
 $r = 0,000000004$

Діаграма розсіювання  $\ln(\text{NO}_x)$  на  
 $\ln(Q \text{ пр})$  та  $\ln(\text{Lambda})$

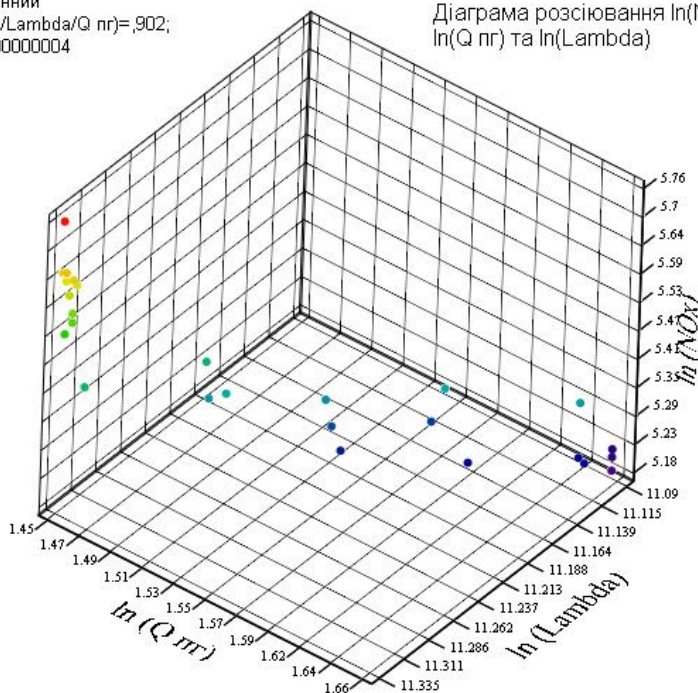


Рисунок 1 — Тримірна діаграма розсіювання змінних

Графік лінійної функції регресії  
 $\ln(\text{NO}_x) = -12,0408 - 0,1015 \cdot \ln(\text{Lambda}) + 1,5685 \cdot \ln(Q \text{ пр})$

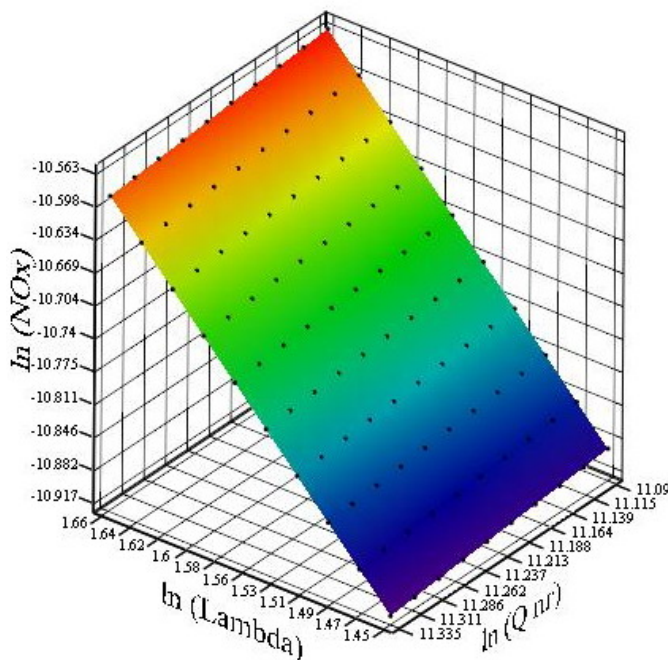


Рисунок 2 — Графік лінійної функції регресії

### Література

1 Ковалко М., Грудз В., Михалків В., Тимків Д., Шлапак Л., Ковалко О. Трубопровідний транспорт газу. – К.: Агентство з раціонального використання енергії та екології, 2002. – 600 с.

2 Шпаков П., Попов В. Статистическая обработка экспериментальных данных. – М.: Из-

дательство Московского Государственного Горного Университета, 2003. – 268 с.

3 Гмурман В. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 2002. – 479 с.

4 Боровиков В. Популярное введение в программу STATISTICA. – М.: Компьютер-пресс, 2000 – 269 с.