

УДК 622.691.4.002

ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ВЕЛИЧИН ВИКИДІВ NO_x, ЯКІ УТВОРЮЮТЬСЯ У ПРОЦЕСІ РОБОТИ ГПА

П.А.Ягода

УМГ “Черкаситрансгаз”, м. Черкаси, вул. Сумгайтська, 3 тел. (0472) 360750
e-mail: pyagoda.ctg@naftogas.net

Проведены корреляционный и регрессионный анализы для исследования зависимости между параметром величины выбросов NO_x и расходом топливного газа. Вычислены коэффициенты корреляции, значения стандартной ошибки, записаны уравнения регрессии. Выбрана оптимальная модель функции 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 and the charge of fuel gas were carried out correlation and regression analyses. Factors of correlation and values of a standard mistake are calculated, the equations of regress are written down. Optimal model of function of regress for definition and forecasting of size of emissions NO_x which are formed during work gas turbine are chosen

У процесі горіння паливного газу в камерах згорання газових турбін утворюються окисли азоту NO та NO₂ (разом названі NO_x) та оксид вуглецю. Найбільш проблематичними та шкідливими за своїм впливом на навколишнє середовище, безперечно, є окисли азоту. Наземні джерела NO_x відіграють важливу роль безпосередньо у фотохімічних процесах тропосфери та у фотохімії стратосфери, причому введення NO_x поблизу тропопаузи може безпосередньо призвести до змін озону у верхніх шарах тропосфери та стратосфери. Такі зміни озонного шару можуть призвести до зміни інтенсивності сонячного ультрафіолетового випромінювання, що досягає поверхні Землі, і може негативно впливати на живі організми, екосистеми та матеріали, що використовуються людиною. Зміна вертикального профілю озону може порушити температурну структуру атмосфери, що призведе до змін погоди та клімату. Перше обмеження на викиди NO_x було прийняте в США і складало 75 ppm (за об'ємом) при вмісті кисню 15% (надлишок повітря 3,5). Для його виконання почали застосовувати вприскування води (співвідношення вода/паливо складало від 0,5 до 3,0). Закон 1983 року щодо вибору найкращих технологій BAST (Best Available Control Technology), що встановив норму в 20 ppm (середнє за одну годину на суху масу продуктів згорання при вмісті кисню 15%), дав поштовх до розвитку техніки спалювання газу.

Застосування у процесі транспортування газу газотурбінних двигунів, які є основним джерелом шкідливих речовин, що поступають в атмосферу, досить значне. У 1999 році 49% замовлень енергетичного обладнання (за потужністю) припадало на газотурбінні установки (ГТУ). Надалі частка газу як палива прогнозується на рівні 80% [4]. Так у газотранспортній системі УМГ “Черкаситрансгаз” частка газоперекачувальних агрегатів із газотурбінними приладами складає 92,5%. З метою мінімізації шкідливого впливу роботи ГТС на навколишнє середовище виникає необхідність проведення де-

тальних аналізів роботи ГПА в розрізі їх впливу на довкілля, які б включали в себе результати натуральних вимірів величин викидів шкідливих речовин, статистичну обробку експериментальних даних, побудову залежності величин викидів від інших параметрів роботи ГПА, прогнозування можливих значень викидів від значень факторного признаку, що задається.

Дослідження складу продуктів згорання двигунів показали, що вміст токсичних складових у продуктах згорання сильно залежить від режиму роботи двигуна. Високі концентрації CO характерні для ГПА на понижених режимах роботи, тоді як вміст оксидів азоту значно зростає при роботі на режимах, близьких до номінального.

Для оптимізації режимів роботи газоперекачувальних агрегатів із врахуванням їх шкідливого впливу на довкілля необхідно, перш за все, побудувати модель, яка б найбільш повно відображала залежність величини викидів NO_x від факторного признаку. Іншими словами, виникає необхідність проведення кореляційно-регресійного аналізу.

Проведена раніше обробка експериментальних даних (натуральних замірів NO_x) для двигунів ГТК 10-ї компресорних станцій газопроводу “Союз”, що знаходяться в зоні обслуговування УМГ “Черкаситрансгаз”, показала достатньо сильний зв'язок між величиною витрати паливного газу та викидами NO_x, дала змогу побудувати емпіричне рівняння прямої регресії, тобто знайти залежність середнього значення величини викиду NO_x від середнього значення витрати паливного газу. Хоча компресорні станції, що досліджувались, обладнані ідентичними ГПА і зв'язок між параметрами досить міцний (R=0.71), для закріплення успіху проведено вивчення наведеної вище залежності для окремого ГПА ГТК-10-ї при роботі на різних режимах. Необхідність додаткового експерименту зумовлена різним технічним станом ГПА, міжремонтним напрацюванням, іншими аспектами умов експлуатації. Крім того, роз-

глянуто різні моделі, що описують залежність між величиною витрати паливного газу та викидами NOx.

Об'єктом дослідження вибрано ГПА ГТК-10-ї ст.№7 КС-Бар газопроводу «Союз». Натуральні заміри проведено для шести режимів роботи з різними величинами витрат паливного газу та викидів NOx. У таблиці 1 наведені результати натуральних вимірів викидів забруднюючих речовин та факторів, які впливають на їх зміну.

Таблиця 1 — Результати натуральних замірів

Nox, кг/доб	Загрузка, %	Розх.пал.газу, м ³ /доб
177	79	65 520
185	79	65 520
182	79	65 520
191	81	67 800
192	81	67 800
215	81	67 800
192	83	71 064
201	83	71 064
218	83	71 064
196	85	74 592
204	85	74 592
214	85	74 592
221	87	78 144
215	87	78 144
231	87	78 144
232	89	83 736
283	89	83 736
287	89	83 736
318	89	83 736
253	89	83 736
266	89	83 736
261	89	83 736
275	89	83 736
282	89	83 736
286	89	83 736
285	89	83 736

За допомогою коефіцієнта кореляції оцінимо міцність зв'язку між величиною витрати паливного газу та викидами NOx

$$R = 0.89.$$

Отже,

+0,7 ≤ R ≤ +1 – зв'язок прямий сильний.

Для визначення того, на скільки відсотків у середньому варіація результативного признаку пояснюється за рахунок варіації факторного признаку, знайдемо коефіцієнт детермінації:

$$D = R^2 \cdot 100\%, \quad D = 79,2\%.$$

За отриманими результатами можна зробити висновок, що дослідження для окремого ГПА значно точніше описують залежність, ніж для ідентичних агрегатів, які працюють в різних умовах.

Побудуємо рівняння прямої регресії

$$y = -160,4403 + 0,0051 * x;$$

але стандартна помилка – міра помилки передбачуваного значення у для окремого значення x, що визначається за формулою

$$S = \sqrt{\frac{1}{(n-2)} \left[\sum (y - \bar{y})^2 - \frac{[\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})]^2}{\sum (x - \bar{x})^2} \right]},$$

буде дорівнювати S=19.17

На рис. 1 зображено графік лінійної регресії Nox на Qпг в добу.

Виходячи з того, що слово «лінійний» в назві «лінійний регресійний аналіз» означає лінійність функції регресії відносно параметрів θ, але не відносно факторів X і зв'язок між фактором та відгуком у може бути нелінійним, побудуємо та дослідимо такі моделі:

1. Модель степеневого типу : $y = a_0 x^{a_1}$;

2. Модель показникового типу : $y = a_0 b^x$.

Після логарифмування моделі степеневого типу будемо мати:

$$\ln y = \ln a_0 + a_1 \ln x = \beta_0 + \beta_1 \ln x.$$

Залежною змінною буде ln y, незалежною – ln x

Побудуємо відповідну таблицю 2.

Таблиця 2 — Значення величини Ln(Nox) викиду від Ln(Qпг) витрати паливного газу

Nox, кг/доб	Розх.пал.газу, м ³ /доб	Ln(Nox), кг/доб	Ln(Qпг)
177	65 520	5,176	11,
185	65 520	5,220	11,
182	65 520	5,204	11,
191	67 800	5,252	11,
192	67 800	5,257	11,
215	67 800	5,371	11,
192	71 064	5,257	11,
201	71 064	5,303	11,
218	71 064	5,384	11,
196	74 592	5,278	11,
204	74 592	5,318	11,
214	74 592	5,366	11,
221	78 144	5,398	11,
215	78 144	5,371	11,
231	78 144	5,442	11,
232	83 736	5,447	11,
283	83 736	5,645	11,
287	83 736	5,659	11,
318	83 736	5,762	11,
253	83 736	5,533	11,
266	83 736	5,583	11,
261	83 736	5,565	11,
275	83 736	5,617	11,
282	83 736	5,642	11,
286	83 736	5,656	11,
285	83 736	5,652	11,

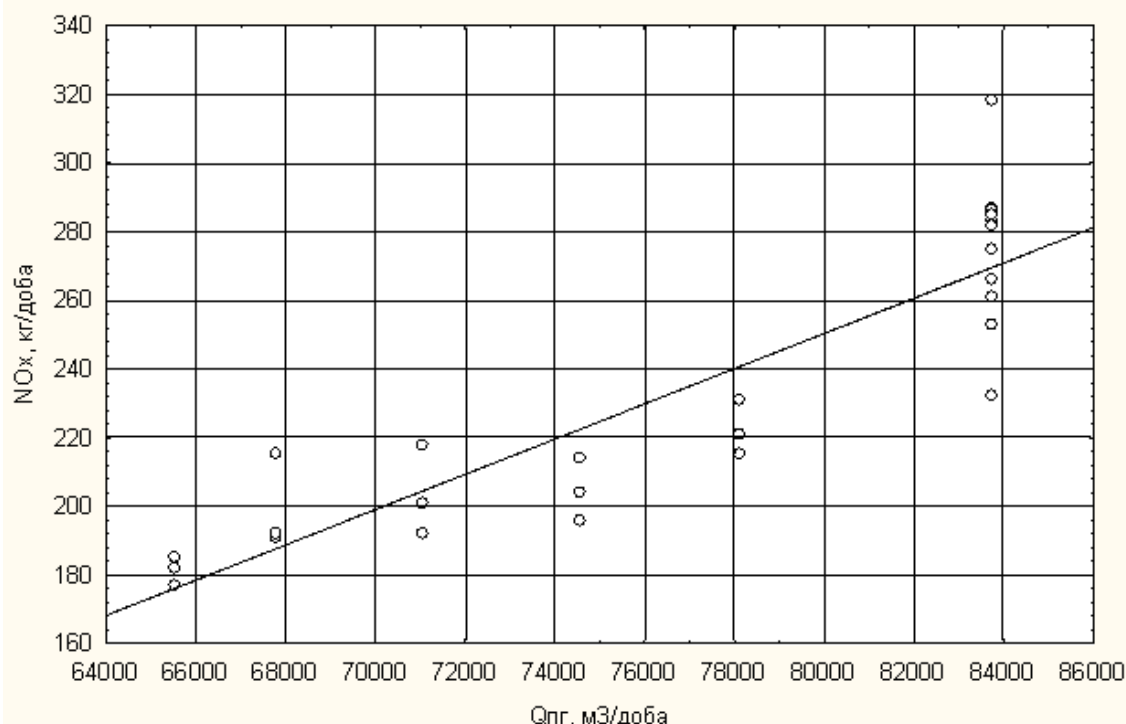


Рисунок 1 — Діаграма розсіювання викидів NOx та розходу паливного газу.
Пряма регресії $y = -160,4403 + 0,0051 * x$

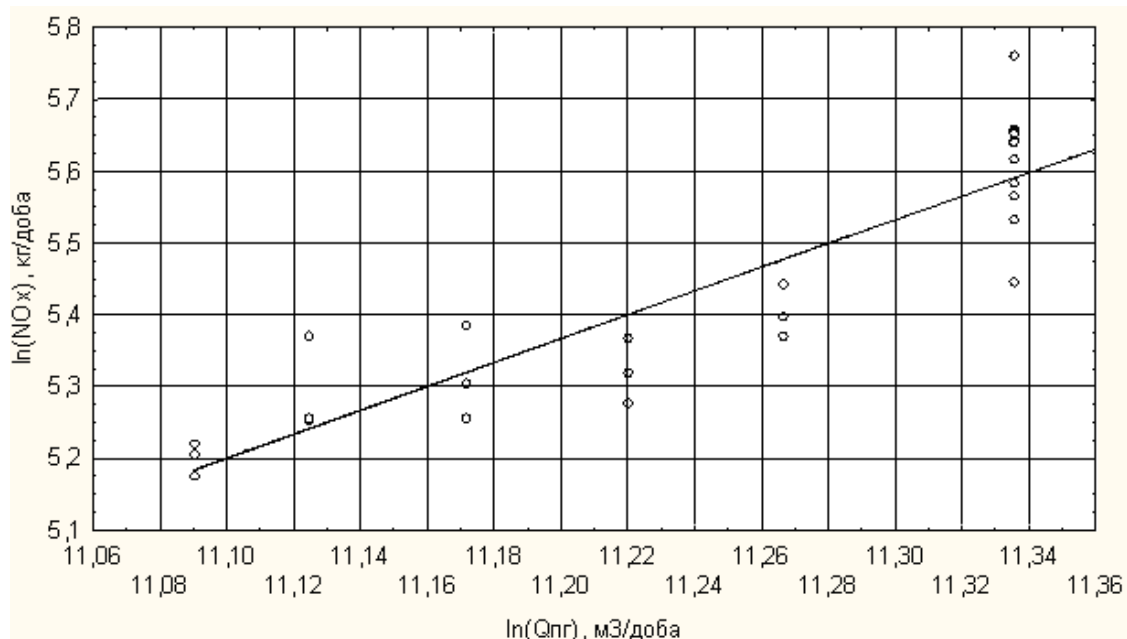


Рисунок 2 — Діаграма розсіювання викидів NOx та розходу паливного газу.
Пряма регресії $\ln y = -13,1723 + 1,6553 * \ln x$

Побудуємо рівняння лінійної регресії $\ln(\text{NOx})$ на $\ln(\text{Qпг})$:

$$\ln y = -13,1723 + 1,6553 * \ln x,$$

причому коефіцієнт кореляції дорівнює $R = 0.9$, а стандартна помилка $S = 0.077$.

Таким чином, отримали значне покращення моделі в плані $D = 81\%$ та $S = 0.077$.

Спробуємо розвинути успіх та дослідити коефіцієнти моделі показникового типу.

Після логарифмування показникової моделі будемо мати:

$$\ln y = \ln a + x \ln b = \beta_0 + \beta_1 x.$$

За даними таблиці 2 побудуємо регресію $\ln(\text{NOx})$ на Qпг в добу, де залежною змінною буде $\ln y$, незалежною – x :

$$\ln y = 3,7389 + 2,2159E - 5 * x.$$

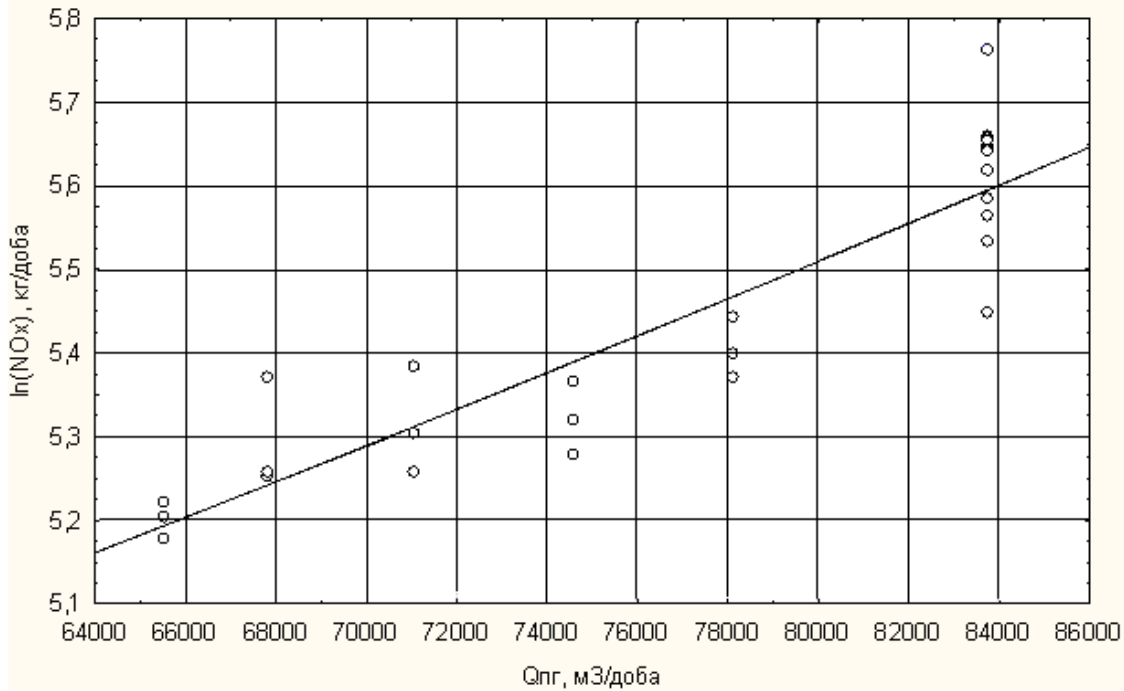


Рисунок 3 — Діаграма розсіювання викидів NOx та розходу паливного газу.
 Пряма регресії $\ln y = 3,7389 + 2,2159E - 5 * x$

В даній моделі з високим рівнем вагомості коефіцієнтів кореляція збільшилась до $R = 0.91$, а стандартна помилка $S = 0.074$ навпаки зменшилась.

На рис. 2 і 3 зображено графіки прямих регресій досліджених моделей:

Таким чином, для газоперекачуючого агрегату, що досліджувався, визначення величини викидів окислів азоту за добовими даними витрати паливного газу слід проводити, застосовуючи лінійну регресію вигляду

$$\ln(NOx) = 3,7389 + 2,2159E - 5 * Q_{nr} .$$

Дана модель характеризується найменшою помилкою прогнозу, а логарифмічна залежність величини шкідливих викидів від витрати паливного газу складає 82.8 відсотків. Також дослідження показує, що для отримання більш точних результатів прогнозування та визначення викидів за даними витрат паливного газу, слід провести натуральні заміри та їх статистичну обробку для кожного окремого ГПА.

Надалі при проведенні оптимізації режимів роботи ГПА за критерієм мінімізації витрат паливного газу, використовуючи результати обробки експериментальних даних методами математичної статистики, необхідно накладати умову мінімальності викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище.

Література

- 1 Ковалко М., Грудз В., Михалків В., Тимків Д., Шлапак Л., Ковалко О. Трубопровідний транспорт газу. – К.: Агенство з раціонального використання енергії та екології, 2002. – 600 с.
- 2 Шпаков П., Попов В. Статистическая обработка экспериментальных данных. – М.: Издательство Московского Государственного Горного Университета, 2003. – 268 с.
- 3 Гмурман В. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 2002. – 479 с.
- 4 Стаття Газотурбинные установки и проблемы вредных выбросов в атмосферу // Теплоэнергетика. – 2003. – №8. – С. 73-78.