
Фізико-технічні проблеми транспорту та зберігання енергоносіїв

УДК 51-74

БАГАТОФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ КОМПЛЕКСНОГО ЕКОЛОГО-ТЕХНІЧНОГО ОБСТЕЖЕННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ НА РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

О.М. Мандрик, В.В. Тирлич, Ю.Д. Михайлюк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42453,
e-mail: o.mandryk@iifng.edu.ua

В статті представлено апробацію аналізу комплексного еколого-технічного обстеження газоперекачувального агрегату в різних технологічних режимах роботи. Проаналізовано виміри концентрації викидних газів (оксидів азоту NO_x та оксиду вуглецю CO) залежно від витрат газу Q , коефіцієнта надлишку повітря, номінальної потужності та температури згоряння.

Визначено, що найбільший вплив на склад викидних газів має коефіцієнт надлишку повітря, менший вплив на оксиди азоту має температура продуктів згоряння, а потужність та розхід газу впливають не суттєво.

Ключові слова: технологічні параметри, газоперекачувальний агрегат, оксиди азоту, оксиди вуглецю, еколого-технічне обстеження.

В статье представлена апробация анализа комплексного эколого-технического исследования газоперекачивающего агрегата на разных технологических режимах работы. Проанализированы измерения концентрации выхлопных газов (оксидов азота NO_x и оксида углерода CO) в зависимости от расхода газа Q , коэффициента избытка воздуха, номинальной мощности и температуры сгорания.

Определено, что наибольшее влияние на состав выхлопных газов имеет коэффициент избытка воздуха, меньшее влияние на оксиды азота имеет температура продуктов сгорания, а мощность и расход газа влияют не существенно.

Ключевые слова: технологические параметры, газоперекачивающий агрегат, оксиды азота, оксиды углерода, эколого-техническое исследование.

The article deals with the analysis approval of the complex environmental technical inspection of the gas-pumping unit under different technological operation modes. It analyzed the measurements of exhaust gases concentration (nitrogen oxide NO_x and carbon oxide CO) depending on the gas consumption Q , excess air coefficient, power rating, and combustion temperature.

It was found out that the greatest influence on the composition of the exhaust gases is exerted by the coefficient of excess air, combustion products temperature has lesser influence on the nitrogen oxides, and the power and gas consumption make an insignificant influence.

Key words: technological parameters, gas-pumping unit, nitrogen oxides, carbon oxides, environmental technical inspection.

Вступ. Проблема зниження токсичності продуктів згоряння газоперекачувальних агрегатів (ГПА), що перебувають в експлуатації на компресорних станціях магістральних газопроводів, є складовою програми науково-технічного прогресу газової промисловості [1]. На основі аналізу сучасних способів організації

робочого процесу і тенденцій щодо покращення ефективності роботи паливоспалюючих пристроїв сформульовано основні вимоги, яким повинні відповідати низькоемісійні камери згоряння [2-7]. Для їх впровадження необхідно підвищувати ефективність проектування низькоемісійних камер згоряння.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій. Основними напрямками зниження токсичності продуктів згоряння в палинкових системах різного призначення є: застосування надлишків повітря (В.А. Христич, Г.Н. Любчик, Н.К.Ріск, Д.Велс); використання стадійного горіння (И.Я. Сигал, А.Г. Тумановский, А.Лефер); гомогенізація зони горіння (Г. Леонард, С.М. Кореа); застосування мікрофакельного горіння (С.Д. Сердюк, Н.П. Даниленко, Г.Б. Варламов, А.М. Маркушин, А.М. Постненков, В.П. Савченко); застосування каталітичних технологій горіння (Г.Н.Любчик, Г.С.Марченко, Б.И. Шелковский, С. Вілкес, С.В. Сантанам). Актуальним завданням є розроблення та вибір математичних моделей процесів горіння в низькоемісійних камерах згоряння [8].

Висвітлення основного матеріалу. З метою вдосконалення системи згоряння газу нами проведено комплексне еколого-технічне обстеження роботи газоперекачувального агрегату (ГПА) Богородчанського ЛВУМГ. Всі заміри виконували відповідно до діючих методик.

Дослідження проводили на діючому ГПА у різних робочих режимах в межах обмежень, передбачених конкретними технологічними умовами. Параметри вимірювали для різних режимів роботи в діапазоні навантажень від 50% до максимальної потужності, яка визначена умовами випробувань за температурою зовнішнього середовища і режимом роботи компресорної станції. При цьому режими встановлювали переходом від меншого навантаження до більшого і навпаки.

Вимірювання проводили на сталих режимах, тобто, коли відхилення основних величин в межах дослідження не виходило за межі вимог ГОСТ 20440-75 після стабілізації режиму (зокрема, температура циркуляційного повітря і продуктів згоряння $\pm 1\%$ тощо).

У кожному з режимів проводили не менше трьох замірів; загальна тривалість одного дослідження – не менше 15 хв.

У зимовий період забезпечувалось досягнення температури продуктів згоряння в межах її штатного виміру до значення, близького до номінального, за рахунок подавання гарячого повітря або продуктів згоряння у всмоктуючий тракт компресора або за рахунок додавання протизамерзаючої системи.

Відтак вимірювали концентрацію оксидів азоту NO_x і оксиду вуглецю CO у викидних газах ГПА. Одночасно в режимах випробувань реєстрували основні теплотехнічні параметри ГПА.

За результатами вимірювання для номінального режиму визначалися такі показники:

– фактичні концентрації в сухих продуктах згоряння, $\text{мг}/\text{м}^3$;

– приведені концентрації (за умови концентрації кисню 15 %) в сухих продуктах згоряння при температурі 0°C і тиску 0,1013 МПа, $\text{мг}/\text{м}^3$;

– температура продуктів згоряння, $^\circ \text{C}$.

Номінальний режим згідно з ГОСТ 28775-90 для станційних умов: розрахункові температура, тиск і відносна вологість атмосферного повітря склали відповідно $+15^\circ \text{C}$, 0, 10-13 МПа і – 60% з урахуванням гідравлічних опорів вхідного і вихідного тракту, за відсутності теплообмінника утилізації і відбору стисненого повітря. За наявності двопотокової викидної системи вимірювання проводили в обох газоходах з подальшим усередненням результатів вимірювань.

Методику комплексного екологічного обстеження характеристик газотурбінного ГПА апробували на ГПА типу ГТК-10-2, оснащеному ГТД типу ГТК-10-ОР на компресорній станції Богородчанського лінійно-виробничого управління магістральних газопроводів.

Концентрації оксидів азоту і вуглецю у викидах визначали прямим інструментальним методом за допомогою газоаналізатора Testo-350 M/XL. Основною одиницею вимірювання концентрації забруднюючої речовини вибрано $\text{мг}/\text{м}^3$ (м^3 при 0°C і 0,1013 МПа).

Технологічні фактори в залежності від робочих режимів змінювались в таких межах: потужність – 6034-8649 кВт, температура згоряння – $550-770,2^\circ \text{C}$, коефіцієнт надлишку повітря – 5,41-8,75, витрата газу – 1390-3187 $\text{м}^3/\text{год}$. При цьому було одержано різні значення показників токсичності продуктів згоряння, які змінювались в таких межах: оксид азоту (NO) – 32,2-68,5 $\text{мг}/\text{м}^3$, диоксид азоту (NO_2) – 16,2-43 $\text{мг}/\text{м}^3$, оксиду вуглецю (CO) – 70,4-480,2 $\text{мг}/\text{м}^3$.

За результатами вимірювань у різних режимах були побудовані базові залежності концентрацій оксидів азоту та оксиду вуглецю залежно від витрати газу Q, коефіцієнта надлишку повітря $K_{\text{нп}}$, номінальної потужності П та температури згоряння T_3 .

Також нами побудовано парні зв'язки вказаних технологічних параметрів (рис. 1-3) та одержано рівняння парних регресій (табл. 1-3). Це дало змогу провести попередній аналіз і зробити такі висновки:

Як видно з рисунку 1 та таблиці 1, на концентрацію викидів оксиду азоту **NO** найбільший вплив має коефіцієнт надлишку повітря $K_{\text{нп}}$. З підвищенням $K_{\text{нп}}$ концентрація азоту зростає і набуває майже лінійної залежності і відносно високого коефіцієнта кореляції – **0,7898**. Рівняння регресії задовільно описує розкид експериментальних даних. Температура продуктів згоряння T_3 при цьому має нелінійний (експоненціальний) характер, і при її зростанні концентрація **NO** спадає, але має відносно великий коефіцієнт кореляції – **0,667**. Про вплив двох інших параметрів потужності **П** та витрати газу **Q**, можна сказати, що: характер кривих є відповідно експоненціальним та лінійним, але зі зростанням концентрація оксиду азоту **NO** **дещо** зростає, про що свідчать незначні коефіцієнти кореляції: відповідно **0,035** та **-0,081**. Однак казати про те, що ці параметри не мають впливу на концентрацію оксиду азоту **NO**, **неможливо**. Потрібно дослідити їх взаєм-

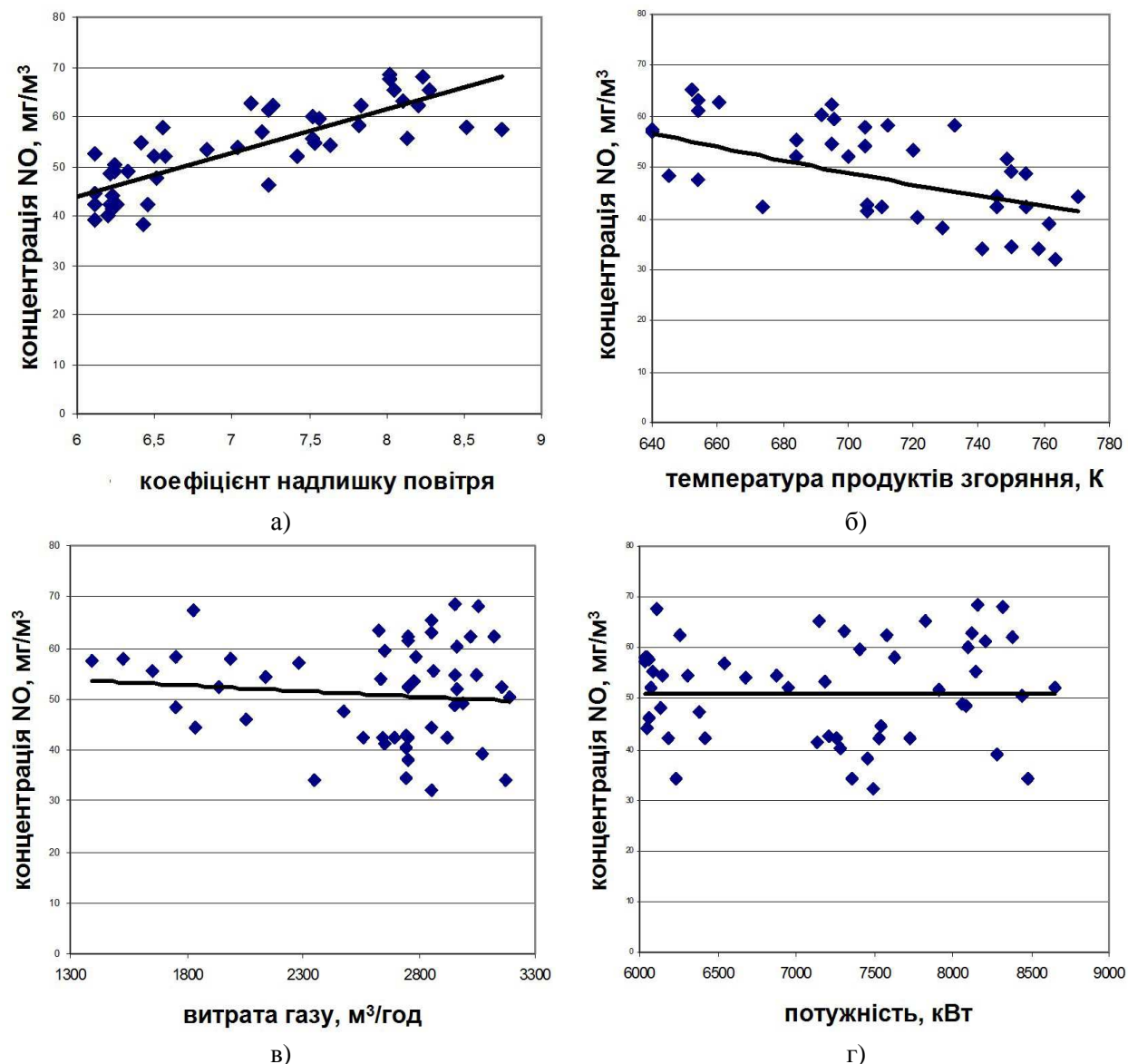


Рисунок 1 – Парний взаємозв'язок залежності концентрації оксиду азоту NO та надлишку повітря (а); температури продуктів згоряння (б); витрати газу (в); потужності (г)

ний вплив, оскільки парний зв'язок не може бути таким тісним, як у комплексі.

Аналізуючи парні зв'язки для концентрації диоксидів азоту NO_2 (рисунок 2 та таблиця 2), слід зауважити, що коефіцієнт надлишку повітря $K_{\text{нп}}$ характеризується лінійним зв'язком при зростанні $K_{\text{нп}}$ концентрація викидів диоксидів азоту NO_2 зростає і це зростання є в межах від 16 до 43 mg/m^3 . Про це свідчить порівняно високий коефіцієнт кореляції. Зменшенню концентрації викидів диоксиду азоту NO_2 сприяє температура продуктів згоряння T_z з коефіцієнтом кореляції $-0,508$, що вказує на тісний зв'язок між цими параметрами.

Щодо впливу потужності P та витрати газу Q , то їх характеризують нелінійною (експоненціальною) залежністю, для витрати газу з відносно слабким коефіцієнтом кореляції $0,133$ та лінійною залежністю для потужності, з коефіцієнтом кореляції $0,238$, які вказують на те, що ці параметри в парній кореляції мають вплив на концентрацію диоксиду азоту NO_2 ,

хоча він не такий суттєвий. Тому потрібно розглянути їх спільний вплив на концентрацію викидів газів NO_2 .

На концентрацію викидів вуглекислого газу CO (рисунок 3 та таблиця 3) найбільше впливає коефіцієнт надлишку повітря $K_{\text{нп}}$, для якого характерна лінійна залежність. Так, з підвищенням $K_{\text{нп}}$ концентрація CO зменшується в межах від 480,2 mg/m^3 до 89,2 mg/m^3 . Коефіцієнт кореляції вуглекислого газу CO рівний $-0,708$, вказує на тісний зв'язок між цими параметрами.

Суттєвий вплив на концентрацію викидів газу CO має також температура продуктів згоряння T_z , яка має лінійний характер, але уже в бік зростання концентрації CO . Коефіцієнт кореляції рівний $0,4568$ і також чинить на неї вплив.

Вплив інших параметрів не суттєвий, про що свідчать їхні низькі значення коефіцієнтів кореляції: відповідно $-0,0438$ для потужності та $0,0374$ для витрати газу.

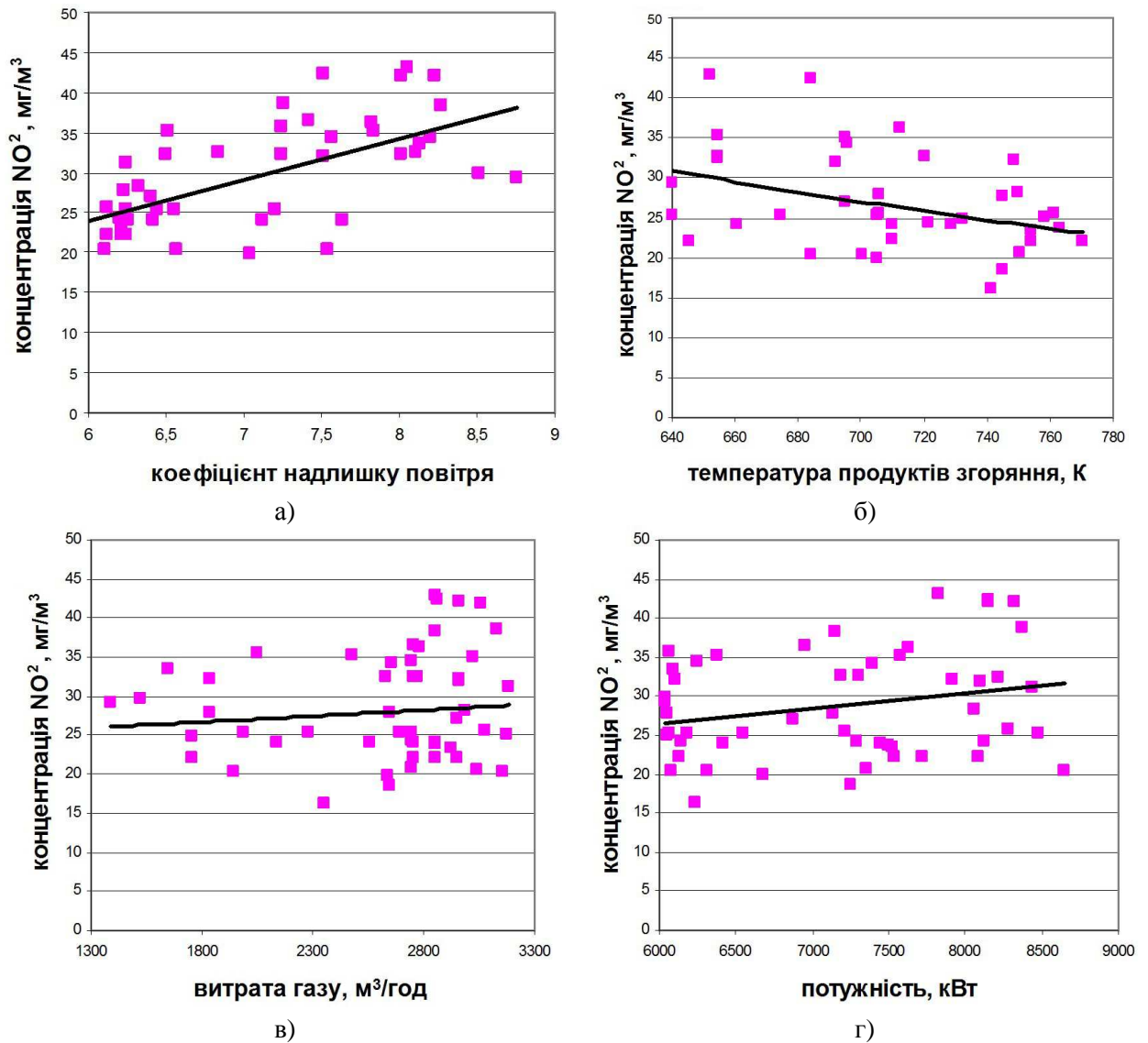


Рисунок 2 – Парний взаємозв'язок залежності концентрації диоксиду азоту NO_2 та надлишку повітря (а); температури продуктів згоряння (б); витрати газу (в); потужності (г)

Концентрація викидів газу CO при зростанні розходу газу майже не змінюється і коливається в межах $150\text{-}250\text{ мг/м}^3$. Зі зростанням потужності залежність набуває ступеневого характеру із пониженням концентрації CO .

Виходячи з результатів аналізу одержаних експериментальних даних та проведеного парного регресійного аналізу встановлено, що найбільший вплив на концентрацію викидних газів мають коефіцієнт надлишку повітря $K_{\text{ндп}}$ та температура продуктів згоряння T_z , які мають високі коефіцієнти кореляції та адекватно описують експериментальні дані. Щодо потужності P та витрати газу Q , то 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.

З експериментальних даних видно, що між технологічними параметрами та викидними продуктами згоряння відсутній чіткий функціональний зв'язок. Тому для дослідження ком-

плексного впливу перелічених параметрів використали багатofакторний кореляційно-регресійний аналіз [9,10], що дає можливість оцінити міру впливу на концентрацію викидних газів кожного з параметрів при фіксованому на середньому рівні інших параметрів.

Отже, нам потрібно знайти аналітичний вираз, котрий якнайкраще відображає зв'язок факторних ознак з результативною, тобто знайти функцію

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_p, a_0, a_1, \dots, a_p), \quad (1)$$

де a_0, a_1, \dots, a_n – коефіцієнти рівняння регресії, яка забезпечує найменший розкид емпіричних точок відносно поверхні, що описується цією функцією.

Враховавши те, що емпіричне обґрунтування типу функції за допомогою графічного аналізу зв'язків для багатofакторних моделей майже неможливе, а підбір функцій різних типів пов'язаний з великою кількістю зайвих обчислень, а також, зважаючи на те, що будь-яку функцію багатьох змінних шляхом логарифму-

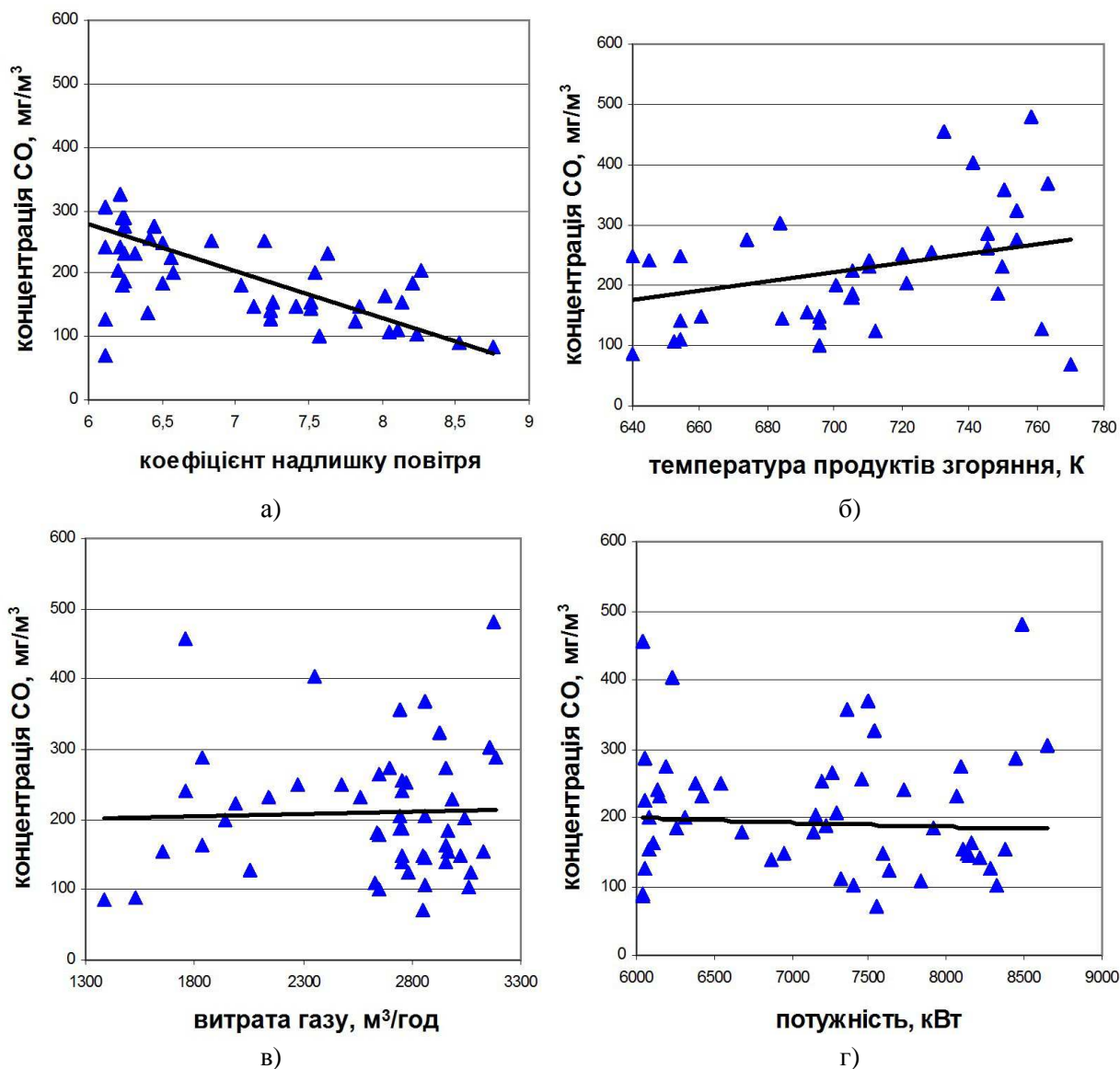


Рисунок 3 – Парний взаємозв’язок залежності концентрації оксиду вуглецю CO та надлишку повітря (а); температури продуктів згоряння (б); витрати газу (в); потужності (г)

вання або заміни змінних, можна звести до лінійного вигляду, рівняння множинної регресії можна виразити у лінійній формі у вигляді

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \dots + a_n x_n \quad (2)$$

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

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 \quad (3)$$

де y – розрахункові значення результативної ознаки-функції, в нашому випадку це буде концентрація викидних газів;

x_1, x_2, x_3, x_4 – факторні ознаки, причому $x_1 = \Pi$; $x_2 = Tз$; $x_3 = K_{нп}$; $x_4 = Q$;

a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 — параметри рівняння, які обчислимо методом найменших квадратів, розв’язавши систему нормальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} & na_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 + a_3 \sum x_3 + \\ & \qquad \qquad \qquad + a_4 \sum x_4 = \sum y; \\ & a_0 \sum x_1 + a_1 \sum x_1^2 + a_2 \sum x_1 x_2 + \\ & \qquad \qquad \qquad + a_3 \sum x_1 x_3 + a_4 \sum x_1 x_4 = \sum x_1 y; \\ & a_0 \sum x_2 + a_1 \sum x_1 x_2 + a_2 \sum x_2^2 + \\ & \qquad \qquad \qquad + a_3 \sum x_2 x_3 + a_4 \sum x_2 x_4 = \sum x_2 y; \\ & a_0 \sum x_3 + a_1 \sum x_1 x_3 + a_2 \sum x_2 x_3 + \\ & \qquad \qquad \qquad + a_3 \sum x_3^2 + a_4 \sum x_3 x_4 = \sum x_3 y; \\ & a_0 \sum x_4 + a_1 \sum x_1 x_4 + a_2 \sum x_2 x_4 + \\ & \qquad \qquad \qquad + a_3 \sum x_3 x_4 + a_4 \sum x_4^2 = \sum x_4 y; \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Кожний коефіцієнт рівняння (4) вказує на ступінь впливу відповідного фактора на ре-

Таблиця 1 – Рівняння парної регресії концентрації оксиду азоту NO залежно від технологічних параметрів

Рівняння регресії	Кількість спостережень	Коефіцієнт кореляції
$C_{NO} = 8,73 K_{HP} - 8,608$	52	0,789895
$C_{NO} = 48,478\Pi^{0,0053}$	52	0,035649
$C_{NO} = 269,97e^{-0,00213}$	52	-0,66701
$C_{NO} = 56,753e^{-4E-05Q}$	52	-0,08125

Таблиця 2 – Рівняння парної регресії концентрації діоксиду азоту NO₂ залежно від технологічних параметрів

Рівняння регресії	Кількість спостережень	Коефіцієнт кореляції
$C_{NO_2} = 5,1791 K_{HP} - 7,104$	52	0,669387
$C_{NO_2} = 0,0019\Pi + 14,953$	52	0,238202
$C_{NO_2} = 127,29e^{-0,00213}$	52	-0,50812
$C_{NO_2} = 24,16e^{-6E-05Q}$	52	0,133021

Таблиця 3 – Рівняння парної регресії концентрації оксиду вуглецю CO залежно від технологічних параметрів

Рівняння регресії	Кількість спостережень	Коефіцієнт кореляції
$C_{CO} = -73,708 K_{HP} + 719,56$	52	-0,70798
$C_{CO} = 0,7763T_3 - 321,8$	52	0,456814
$C_{CO} = 1503,4\Pi^{-0,232}$	52	-0,04387
$C_{CO} = 0,0073Q + 190,72$	52	0,037456

зультативний 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 обмеженим числом експериментальних даних, містять елементи випадковості, по суті, є випадковими величинами. В зв'язку з цим виникає потреба перевірити значущість цих вибіркових характеристик.

Критерій перевірки адекватності функції регресії полягає у перевірці значущості коефіцієнта множинної кореляції R. Для цього висувається гіпотеза $H_0: R^2=0$ 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 (значущого) впливу на відгук. Як альтернативу розглянемо гіпотезу $H_1: R^2 \neq 0$, тобто хоча б один з коефіцієнтів регресії $a_i \neq 0$. При перевірці цієї гіпотези використовується статистика:

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-p}{p-1}, \quad (5)$$

де n – кількість спостережень, за якими обчислювали значення R;

p – число параметрів регресії.

При перевірці гіпотези H_0 використовується правостороння критична 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 нульова гіпотеза H_0 відхиляється та приймається альтернативна гіпотеза H_1 . В цьому випадку коефіцієнт детермінації R^2 суттєво відрізняється від нуля, функція регресії статистично значуща та адекватно описує вихідні дані.

Ступінь впливу кожної з ознак, що входить в (3), будемо оцінювати на основі перевірки гіпотези про статистичну значущість коефіцієнта рівняння регресії, що відповідає даній ознаці.

Для цього висувається гіпотеза $H_0: a_i=0$, про те, що фактор x_i , не має суттєвого впливу на відгук y . Як альтернатива висувається гіпотеза $H_1: a_i \neq 0$. При перевірці даної гіпотези використовується двостороння 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.

Таблиця 4 – Коефіцієнти регресії для викидів оксиду азоту NO

a_i	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
t	0,634757	1,677658	-1,6938	4,96856	0,66289

Якщо $t_i \leq T_{кр}$, приймається гіпотеза $H_0: a_i=0$, в протилежному випадку вважається, що цей коефіцієнт відмінний від нуля.

Враховуючи, що об'єм даних є порівняно великий, для знаходження коефіцієнтів рівняння регресії застосуємо програму Excel з вбудованими статистичними функціями. [10]. Розрахунки проводимо окремо для оксиду азоту NO, диоксиду азоту NO₂ та вуглекислого газу CO. Одержимо такі числові дані:

Для викидів оксиду азоту NO коефіцієнти регресії: $a_0=15,33187$; $a_1=0,002833$; $a_2=-0,03974$; $a_3=7,034338$; $a_4=7,034338$; коефіцієнт детермінації: $R^2=0,666447$; розрахункове значення статистики $F=23,47676$; число спостережень $n=52$; число параметрів регресії ступенів вільності знаменника $p=5$; число ступенів вільності знаменника $p-1=4$; число ступенів вільності чисельника $n-p=47$; середньокваратичне відхилення нормальної випадкової величини ε : $SE_{y0}=24,1539$; $SE_{y1}=0,001689$; $SE_{y2}=0,023465$; $SE_{y3}=1,41577$; $SE_{y4}=0,003078$; дисперсія ε : $SE_y^2=5,87259$; сума квадратів, зумовлена регресією: $SS_{рег.}=3238,602$; сума квадратів залишків: $SS_{зал.}=1620,904$.

Рівняння регресії запишеться:

$$C_{NO} = 15,33187 + 0,002833\Pi - 0,03974T_3 + 7,034338K_{нп} - 0,00204Q. \quad (6)$$

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 $F=23,47676$ порівняємо з табличним критичним значенням

$$F_{кр} = f(0,01;5;47) = 3,44 \leq F = 23,47676.$$

Це свідчить про 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 змінними C_{NO} та Π , T_3 , $K_{нп}$, Q відхиляється як така, що протирічить даним фактичним спостереженням.

Оцінимо значущість вибірових коефіцієнтів регресії a_0 ; a_1 ; a_2 ; a_3 ; a_4 . Задамося 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 наведено в таблиці 4.

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 витрата газу Q не мають суттєвого впливу на результуючу ознаку – концентрацію оксиду азоту C_{NO} .

Для викидів диоксиду азоту NO₂ коефіцієнти регресії: $a_0=-13,9307$; $a_1=0,002633$; $a_2=-0,01527$; $a_3=4,829522$; $a_4=0,000312$; коефіцієнт детермінації: $R^2=0,56005$; розрахункове значення статистики $F=14,95756$; число спостережень $n=52$; число параметрів регресії ступенів вільності знаменника $p=5$; число ступенів вільності знаменника $p-1=4$; число ступенів вільності чисельника $n-p=47$; середньокваратичне відхилення нормальної випадкової величини ε : $SE_{y0}=19,41967$; $SE_{y1}=0,001358$; $SE_{y2}=0,018866$; $SE_{y3}=1,138275$; $SE_{y4}=0,002475$; дисперсія ε : $SE_y^2=4,721545$; сума квадратів, зумовлена регресією: $SS_{рег.}=1333,795$; сума квадратів залишків: $SS_{зал.}=1047,771$.

Рівняння регресії запишеться:

$$C_{NO_2} = -13,9307 + 0,002633\Pi - 0,01527T_3 + 4,829522K_{нп} - 0,000312Q. \quad (7)$$

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 будемо мати

$$F_{кр} = f(0,01;4;47) = 3,51 - \frac{3,51-3,41}{10} \cdot 7 = 3,44.$$

Одержане розрахункове значення $F=14,95756$, порівняємо з табличним критичним значенням

$$F_{кр} = f(0,01;5;47) = 3,44 \leq F = 14,95756,$$

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 змінними C_{NO_2} та Π , T_3 , $K_{нп}$, Q і відхиляється як така, що протирічить даним фактичним спостереженням.

Оцінимо значимість вибірових коефіцієнтів регресії a_0 ; a_1 ; a_2 ; a_3 ; a_4 . Задамося 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 (таблиця 5).

Не всі обчислені значення коефіцієнтів за абсолютною величиною більші за його критичне значення. Для коефіцієнтів a_2 і a_4 ці значення менші, тому такі показники, як температура продуктів згоряння T_3 та витрата газу Q , не мають суттєвого впливу на результуючу ознаку,

Таблиця 5 – Коефіцієнти регресії для викидів диоксиду азоту NO₂

a _i	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
t	-0,71735	1,938891	-0,80963	4,242844	0,126076

Таблиця 6 – Коефіцієнти регресії для викидів оксиду вуглецю CO

a _i	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
t	3,868018	-0,75539	-0,85766	-5,37724	0,106543

якою є концентрація викидів оксиду азоту C_{NO₂}.

Для викидів вуглекислого газу CO коефіцієнти регресії: a₀=1048,353; a₁ = -0,01431; a₂=-0,22582; a₃ =-85,4247; a₄=0,00368; коефіцієнт детермінації: R² = 0,52671; розрахункове значення статистики F=13,07619; 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; середньокваратичне відхилення нормальної випадкової величини ε_i: SE_{y0}=271,031; SE_{y1}=0,018949; SE_{y2}=0,263298; SE_{y3}=15,88636; SE_{y4}=0,034541; дисперсія ε: SE_y² = 65,89634; сума квадратів, зумовлена регресією : SS_{рег.} = 227124,4; сума квадратів залишків: SS_{зал.} = 204089,4.

Рівняння регресії запишеться:

$$C_{CO} = 1048,353 - 0,01431\Pi - 0,22582T_3 - 85,4247K_{НП} + 0,00368Q. \quad (8)$$

Перевіримо на значущість коефіцієнт детермінації R². За допомогою таблиць знайдемо критичне значення F розподілу з числом ступенів вільності n-1=4 та n-p=47, тобто одержимо

$$F_{кр} = f(0,01;4;47) = 3,51 - \frac{3,51 - 3,41}{10} \cdot 7 = 3,44.$$

Одержане розрахункове значення F = 13,07619 порівняємо з табличним критичним значенням

$$F_{кр} = f(0,01;5;47) = 3,44 \leq F = 13,07619,$$

що вказує на те, що коефіцієнт детермінації R² значно відрізняється від нуля. Тому гіпотеза H₀: a₀=a₁ = a₂ = a₃ = a₄ = 0 про відсутність регресійної залежності між змінними CNO₂ та Π, T₃, K_{НП}, Q відхиляється як така, що протирічить даним фактичним спостереженням.

Оцінимо значущість вибірових коефіцієнтів регресії a₀; a₁; a₂; a₃; a₄. Задамося рівнем значущості α = 0,01. Обчислимо критичне значення розподілу Стьюдента з n-p=47 ступенів вільності, порядку $\frac{\alpha}{2} = 0,05$, тобто величину T_{кр.} = t(0,05;47) = 1,689. Використовуючи фор-

мулу $t = \frac{a_i}{SE_i}$, обчислимо значення статистики для кожного з вибірових коефіцієнтів регресії a_i (таблиця 6).

Не всі обчислені значення коефіцієнтів за абсолютною величиною більші за його критичне значення. Для коефіцієнтів a₁, a₂ і a₄ ці значення менші, тому потужність Π, температура

продуктів згоряння T₃ та витрата газу Q не мають суттєвого впливу на результуючу ознаку, якою є концентрація викидів оксиду вуглецю C.

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

$$\varepsilon_i = a_i \cdot \frac{\bar{X}_i}{Y_i}; \quad \beta_i = a_i \cdot \frac{\sigma_{xi}}{\sigma_y}; \quad (9)$$

де a_i – коефіцієнт регресії при і-му факторі;

\bar{X}_i – середнє значення і-го фактора;

Y_i – середнє значення результативної ознаки;

σ_{xi} – середнє квадратичне відхилення і-го фактора;

σ_y – середнє квадратичне відхилення результативної ознаки.

Часткові коефіцієнти еластичності свідчать про те, на скільки відсотків зміниться результативна ознака при зміні на 1% кожного фактора та фіксованому положенні 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 відображають, 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 наведені в таблиці 7.

Висновки

Аналіз часткових коефіцієнтів еластичності свідчить, що за абсолютним приростом найбільший вплив на зростання концентрації викидів оксидів азоту NO має коефіцієнт надлишку повітря, із збільшенням якого на 1% концентрація зростає на 0,939%, а, відповідно, при зростанні на 1% температури продуктів згоряння зменшується на 0,526%, збільшенні потужності

Таблиця 7 – Часткові коефіцієнти еластичності ε_1 та β – коефіцієнти на основі одержаних експериментальних даних для викидів газів NO, NO₂ та CO

Коефіцієнти	Величини коефіцієнтів для викидних газів		
	NO	NO ₂	CO
ε_1	0,393	0,658	-0,489
ε_2	-0,526	-0,525	-0,737
ε_3	0,939	1,163	-2,815
ε_4	-0,103	-0,028	0,046
β_1	$8 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-7}$	$-4 \cdot 10^{-6}$
β_2	-0,00016	-0,00007	-0,0009
β_3	1,695	1,164	-20,59
β_4	$-11 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$19 \cdot 10^{-7}$

на 1% - зростає на 0,393%, і, відповідно, при зростанні витрати газу зменшується на 0,102%.

З одержаних результатів видно, що за абсолютним приростом найбільший вплив на зростання концентрації викидів диоксиду азоту NO₂ має коефіцієнт надлишку повітря, із збільшенням якого на 1% концентрація зростає на 1,163%, а, відповідно, при зростанні на 1% температури продуктів згоряння зменшується на 0,525%, збільшенні потужності на 1% - зростає на 0,658%, і, відповідно, при зростанні витрати газу зменшується на 0,028%.

З одержаних результатів видно, що за абсолютним приростом найбільший вплив на зростання концентрації викидів оксиду вуглецю CO має коефіцієнт надлишку повітря, із збільшенням якого на 1% концентрація зменшується на 2,815%, а, відповідно, при зростанні на 1% температури продуктів згоряння зменшується на 0,737%, збільшенні потужності на 1% - спадає на 0,489%, і, відповідно, при зростанні розходу газу збільшується на 0,046%.

Аналіз коефіцієнтів β свідчить, що на концентрацію в викидах оксиду азоту NO, диоксиду азоту NO₂, а також оксиду вуглецю CO найбільший вплив має коефіцієнт надлишку повітря, з врахуванням їхньої варіації, оскільки йому відповідає найбільше значення β коефіцієнта.

Найбільший вплив на склад викидних газів має коефіцієнт надлишку повітря, менший вплив на оксиди азоту має температура продуктів згоряння, а потужність та витрата газу впливають не суттєво.

Література

1 Концепція (проект) державної науково-технічної програми «створення промислових газотурбінних двигунів нового покоління для газової промисловості та енергетики» / Б. Патон, А. Халатов, Д. Костенко, Б. Білека, О. Письменний, А. Боцула, В. Парафійник, В. Коняхін // Вісник НАН України. – 2008. – № 4 – С. 3-9.

2 Романовський Г.Ф. Камери згоряння суднових газотурбінних двигунів: Навчальний посібник / Г.Ф.Романовський, С.І. Сербін. – Миколаїв: УДМТУ, 2000. – 259 с. – ISBN 5-87848-019-0.

3 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.

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

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

6 Willis J.D. Industrial RB211 DLE Gas Turbine Combustion Update / Willis J.D., Moran A.J. // ASME, 2000. –GT2000-109. – 6 p.

7 NOx 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, B. Facchini, L. Mangani A. Asti, G. Ceccherini, R. Modi] // ASME, 2005. – GT2005-68364. – 13 p.

8 Мостіпаненко Г. Б. Вдосконалення характеристик камери згоряння 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>.

9 Степанишин В.М. Побудова моделі кореляційного аналізу для дослідження багатофакторних процесів і явищ [Електронний ресурс] / Степанишин В.М, Тисовський Л.О. // Національний університет «Львівська політехніка», кафедра ОП Національного лісотехнічного університету України. Режим доступу: <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/15993>

10 Смагин Д.М. Многофакторный регрессионный анализ с помощью MS EXSEL / Смагин Д.М., Горловец Т.В. // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2012. – 6(77). – С. 39-42.

Стаття надійшла до редакційної колегії 19.11.15

Рекомендована до друку професором Грудзом В.Я. (ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) Банахевичем Ю.В.

(відділ експлуатації лінійної частини магістральних газопроводів ПАТ «Укртрансгаз», м. Київ)