



Оскільки швидкість горіння дуже сильно залежить від температури, згорання основної маси газу відбувається в зоні, температура котрої близька до температури продуктів згорання. Швидкість поширення полум'я розраховується

$$U_{nl} = b \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T_2}\right)$$

де  $b$  – показник, що залежить від властивостей суміші.

Таким чином, кількість теплоти, що витрачається на нагрів газової суміші залежить від властивостей газу, а саме щільності, теплоємності та температури. Наявність водяної пари в складі газу в процесі горіння призводить до збільшення витрат енергії на процес горіння та передчасного виходу з ладу приладів та обладнання, що викликано збільшенням концентрації гарячої водяної пари у продуктах згорання. Продукти окислення, що утворюються в результаті хімічної реакції викликають збільшення кількості кислот, котрі впливають на термін експлуатації приладів, а також на навколишнє середовище. Тому, проблема осушення газу та контролю за кількістю вологи в газовій суміші є актуальною проблемою, з точки зору економії енергоресурсів та збереження екологічної безпеки навколишнього середовища.

Літературні джерела:

- 1 Сідак, В.С. Іноваційні технології в діагностиці та експлуатації систем газопостачання: Навч. Посібник.– Харків:ХНАМГ, 2005.– 227с.
- 2 Колпакова, Н. В. Газоснабжение: учебное пособие / Н.В. Колпакова, А.С. Колпаков. – Урал. фед. унив. – Екатеринбург: Изд-во. Урал. ун-та, 2014. – 200 с.

**УДК 622.24.054**

## **РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ ВИКИДІВ ОКСИДІВ АЗОТУ У ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗАХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ**

**М.М. Гнип**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і  
газу, Україна, вул. Карпатська, 15, 76019*

Запаси нафти в надрах Землі невіддільно зменшуються, тому провідні країни світу займаються пошуками альтернативних палив для існуючих двигунів внутрішнього згорання та дослідженням екологічних аспектів при використанні нових палив в ДВЗ.



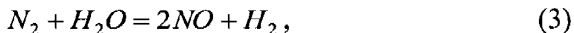
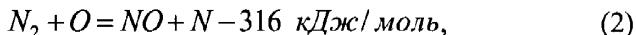
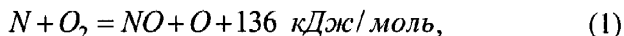
Перспективним видом альтернативних палив в дизельних двигунах, зокрема нафтогазової галузі, є газове паливо. Одним з найбільш канцерогенних компонентів у відпрацьованих газах двигунів є оксиди азоту. В ІФНТУНГ розроблена математична модель розрахунку викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах дизельних двигунів та дизельних двигунів, конвертованих на газове паливо.

При згоранні газового палива в дизельному двигуні, конвертованому на газ, оксиди азоту утворюються внаслідок реакції окислення азоту киснем повітря. При цьому в реакції окислення, в основному, бере участь азот з атмосферного повітря, але за наявності азоту у паливі зазначений азот також буде брати участь у процесі утворення оксидів азоту під час згорання.

В методиці розрахунків ґрунтуємось на основних засадах термічної теорії: кількість оксидів азоту визначається максимальною температурою горіння та концентраціями азоту і кисню в продуктах згорання; кількість оксидів азоту залежить від швидкості охолодження продуктів згорання; утворення діоксидів азоту відбувається інтенсивніше в умовах більш бідної паливно-повітряної суміші; окислення азоту відбувається внаслідок ланцюгового механізму та в зоні продуктів згорання.

При розрахунках прийняті наступні основні припущення: кількість оксидів азоту не залежить від хімічної природи палива, температури та тиски в зоні продуктів згорання однакові у всіх точках камери згорання в даний момент циклу двигуна, продукти згорання однорідні за своїм складом, відомі заряд циліндра, закон згорання палива та індикаторна діаграма.

Загалом механізм утворення оксидів азоту складається з таких реакцій:



Основними оксидами, що утворюються у вихлопних газах двигунів внутрішнього згорання, є  $NO$  та  $N_2O$ . Виходячи з рівнянь (1)-(5) знайдемо швидкість утворення  $NO$  та  $N_2O$  з наступних кінетичних рівнянь:



$$\begin{aligned} \frac{dr_{NO}}{d\tau} = & K_{V_1}^r \cdot r_N \cdot r_{O_2} - K_{R_1}^r \cdot r_{NO} \cdot r_O + K_{V_2}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_O - \\ & - K_{R_2}^r \cdot r_{NO} \cdot r_N + K_{V_3}^r \cdot r_N \cdot r_{H_2O} - K_{R_3}^r \cdot r_{NO} \cdot r_H^2 + \\ & + K_{V_4}^r \cdot r_{N_2O} \cdot r_{O_2} - K_{R_4}^r \cdot r_{NO}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dr_{N_2O}}{d\tau} = & K_{V_5}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_{O_2} - K_{R_5}^r \cdot r_{N_2O} \cdot r_O + \\ & + K_{R_4}^r \cdot r_{NO}^2 - K_{V_4}^r \cdot r_{N_2O} \cdot r_O \end{aligned} \quad (7)$$

де  $r_N, r_{O_2}, r_{NO}, r_O, r_{N_2}, r_{H_2O}, r_H, r_{N_2O}$  – концентрації  $N, O_2, NO, O, N_2, H_2O, H, N_2O$ ,

$K_{V_1}^r, K_{R_1}^r, K_{V_2}^r, K_{R_2}^r, K_{V_3}^r, K_{R_3}^r, K_{V_4}^r, K_{R_4}^r, K_{V_5}^r, K_{R_5}^r$  – константи швидкостей реакції  $(\% \cdot c)^{-1}$ .

Застосуємо принцип стаціонарної концентрації для оксиду діазоту  $N_2O$ , за яким приймемо, що швидкість його утворення буде дорівнювати нулю  $\frac{dr_{N_2O}}{d\tau} = 0$ . Тоді об'ємна концентрація оксиду діазоту  $N_2O$  згідно з (7) буде дорівнювати

$$r_{N_2O} = \frac{K_{V_5}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_{O_2} + K_{R_4}^r \cdot r_{NO}^2}{r_O \cdot (K_{R_5}^r + K_{V_4}^r)} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{dr_{NO}}{d\tau} = & K_{V_1}^r \cdot r_N \cdot r_{O_2} - K_{R_1}^r \cdot r_{NO} \cdot r_O + K_{V_2}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_O - \\ & - K_{R_2}^r \cdot r_{NO} \cdot r_N + K_{V_3}^r \cdot r_N \cdot r_{H_2O} - K_{R_3}^r \cdot r_{NO} \cdot r_H^2 + \\ & + K_{V_4}^r \cdot r_{O_2} \cdot \frac{K_{V_5}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_{O_2} + K_{R_4}^r \cdot r_{NO}^2}{r_O \cdot (K_{R_5}^r + K_{V_4}^r)} - K_{R_4}^r \cdot r_{NO}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

Для переведення констант швидкості з  $\frac{cm^3}{mоль \cdot c}$  у  $(\% \cdot c)^{-1}$

використаємо рівняння  $K^r = \frac{K^c \cdot p}{8,314 \cdot 10^6 \cdot T}$ . Залежності констант



швидкостей хімічних реакцій від температури горіння паливоповітряних сумішей прийняті на підставі аналізу літературних джерел [1-3].

Визначимо швидкість утворення оксидів азоту від кута повороту колінчастого валу з диференційного рівняння утворення оксидів азоту від часу (9) враховуючи, що  $\tau = \frac{\varphi}{6n}$ . Залежність швидкості утворення оксидів азоту від градусів кута повороту колінчастого валу запишемо у вигляді квадратного рівняння

$$\frac{dr_{NO}}{d\varphi} = A + B \cdot r_{NO} + C \cdot r_{NO}^2, \quad (10)$$

де

$$A = \frac{p}{49,884 \cdot T \cdot n} \cdot \left( \begin{array}{l} K_{V_1}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_{O_2} + K_{V_2}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_{O_2} + \\ + \frac{K_{V_5}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_{O_2} \cdot K_{R_4}^r}{K_{R_5}^r + K_{V_4}^r} \end{array} \right), \quad (11)$$

$$B = \frac{p \cdot (K_{R_1}^r \cdot r_{O_2} + K_{R_2}^r \cdot r_{N_2})}{49,884 \cdot T \cdot n}, \quad (12)$$

$$C = \frac{p}{49,884 \cdot T \cdot n} \cdot \left( \frac{K_{R_5}^r \cdot K_{R_4}^r}{K_{R_5}^r + K_{V_4}^r} \right) \quad (13)$$

Проінтегрувавши (10) одержимо

$$\frac{\left| r_{NO} + \frac{B}{2C} - \sqrt{\frac{B^2 - 4AC}{4C^2}} \right|}{\left| r_{NO} + \frac{B}{2C} + \sqrt{\frac{B^2 - 4AC}{4C^2}} \right|} = e^{\left( 2C \cdot \sqrt{\frac{B^2 - 4AC}{4C^2}} \cdot (\varphi + const) \right)}. \quad (14)$$

Позначимо  $\beta = \sqrt{\frac{B^2 - 4AC}{4C^2}}$ . Тоді об'ємна концентрація оксидів азоту  $r_{NO}$  може бути визначена з рівняння



$$r_{NO} = \frac{\pm \left( \frac{B}{2C} + \beta \right) \cdot \left| \frac{r_{NO} + \frac{B}{2C} - \beta}{r_{NO} + \frac{B}{2C} + \beta} \right| \cdot e^{\left( 2C \cdot \beta (\varphi + const) - \frac{B}{2C} + \beta \right)}}{1 \pm \left| \frac{r_{NO} + \frac{B}{2C} - \beta}{r_{NO} + \frac{B}{2C} + \beta} \right| \cdot e^{(2C \cdot \beta (\varphi + const))}} \quad (15)$$

Отже, виразом (15) описана математична модель, яка дозволяє визначити вихідну концентрацію оксидів азоту у відпрацьованих газах переобладнаних на газове паливо дизельних двигунів в залежності від вихідних параметрів: констант швидкостей хімічних реакцій, початкової концентрації оксидів азоту, зміни кута повороту колінчастого вала двигуна та температури згорання газоповітряної суміші.

Літературні джерела

1 Iwasaki M. A comparative study of “standard”, “fast” and “NO2” SCR reactions over Fe/zeolite catalyst // Applied Catalysis A: General. 2010. Vol. 390. Iss. 1–2. P. 71–77.

2 Grossalea A. The chemistry of the NO/NO2–NH3 “fast” SCR reaction over Fe-ZSM5 investigated by transient reaction analysis // Journal of Catalysis. 2008. Vol. 256. Iss. 2. P. 312–322.

3 PiaRuggeri M. FTIR in situ mechanistic study of the NH3–NO/NO2 “Fast SCR” reaction over a commercial Fe-ZSM-5 catalyst // Catalysis Today. 2012. Vol. 184, Iss. 1. P. 107–114.

УДК 621.18

## ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ НА ЕЖЕКЦІЮ В НИЗЬКОНАПІРНОМУ ЗАПАЛЬНОМУ ПАЛЬНИКУ

*О. А. Григор'єв, М.М. Кологривов*

*Одеська національна академія харчових технологій  
65039, м. Одеса, вул. Канатна, 112  
hryhoriev\_oa@hotmail.com*

На газових і нафтових промислах, на газопереробних і нафтопереробних заводах експлуатуються факельні установки для спалювання технологічних газів. Газові викиди включають