УДК 628.543.49

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ З РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ ПРОДУКТІВ ЗГОРАННЯ ДЛЯ ЦІЛЕЙ УПРАВЛІННЯ

Бакшанська Т.Д., Рижиков Ю.Г., Тодорцев Ю.К.

Задача управління процесом спалювання природного газу формулюється і вирішується як оптимізаційна [1]. Існуючі системи автоматичного управління горінням, що змінюють коефіцієнт надлишку повітря впливом на співвідношення "паливо – повітря" з корекцією за вмістом у димових газах кисню, недостатньо ефективні, особливо для високоефективних топкових пристроїв. Розповсюджені системи автоматичного регулювання процесом горіння з корекцією за вмістом кисню або продуктів недопалу, які виходять з топкових пристроїв, оптимізують процес тільки з огляду на повноту згорання, то б то вирішується лише задача мінімізації суми втрат з газами, які виходять з топкових пристроїв, і хімічною неповнотою згорання. Додаткове врахування утворення в процесі горіння токсичних продуктів згорання змушує переглянути традиційну формалізацію задачі оптимізації процесу горіння та ввести в розгляд одночасно два критерії, що враховують економічність і токсичність процесу горіння. Один зі способів згортки критеріїв приводить до адитивного узагальненого критерію оптимізації, вираженого через склад продуктів згорання.

Крім того, актуальною, на наш погляд, є задача дослідження додаткових (крім співвідношення "паливо – повітря") впливів, що можуть бути використанні для управління процесом горіння з метою зниження токсичності продуктів згорання, одним з яких є спалювання природного газу з рециркуляцією продуктів згорання. Експериментальних даних за повним складом продуктів згорання природного газу з рециркуляцією димових газів у топкових пристроях практично немає.

На основі якісного аналізу можна припустити, що такі процеси мають низку суттєвих відмін у порівнянні зі спалюванням газу у чистому повітрі. По-перше, запалення та горіння проходить у середовищі зі зниженим вмістом кисню та підвищеною кількістю баластних газів. По-друге, вміст кисню може бути змінним. По-третє, гази рециркуляції, які надходять до топки, містять токсичні компоненти, які додатково впливають на остаточну токсичність продуктів згорання.

Такий критерій у виді суми двох доданків, що враховують екологічні фактори й економічність процесу горіння, причому кожний з доданків представлено у виді безрозмірних комплексів [2], має вид:

$$I = I_{ек} + I_e \qquad (1)$$

де $I_{ек} = \frac{H_2}{H_2^{доп}} + \frac{CO}{CO^{доп}} + \frac{O_2}{O_2^{доп}}$ - критерій, що характеризує економічність процесу горіння,

де H_2, CO, O_2 - концентрація водню, оксиду вуглецю та кисню у димових газах; $H_{2_i^{доп}}$, $CO^{доп}$, $O_2^{доп}$ - допустимі значення концентрацій відповідних компонентів.

$I_e = \frac{CO}{CO^{ГПВ}} + \frac{NO}{NO^{ГПВ}}$ - критерій, що характеризує токсичність процесу горіння,

де CO, NO - поточне значення оксиду вуглецю та оксиду азоту; $CO^{ГПВ}$, $NO^{ГПВ}$ - гранично допустимі викиди відповідних компонентів.

Доцільність використання узагальненого критерію для автоматичної оптимізації процесу горіння визначається тим, що практично всі його складові залежать від співвідношення "паливо - повітря", найважливішого фактора, що визначає режим горіння та ступінь рециркуляції.

 ISBN 7-776-8361-7

Оскільки всі складового критерію виражаються через склад продуктів згорання, то, узагальнений критерій оптимізації вимагає знання практично повного складу димових газів. У даний час із усіх компонентів газів, що виходять з топкових пристроїв, що враховуються критерієм, є можливість вимірювати лише кисень і продукти недопалу (водень і окис вуглецю).

Для дослідження процесу горіння природного газу з рециркуляцією продуктів згорання розроблена математична модель, яка побудована на методі розрахунку рівноважних продуктів реакцій, що дозволяє отримати достатньо докладний склад димових газів [3]. Математична модель є системою з трьох груп рівнянь хімічної рівноваги: рівнянь дисоціації, матеріального балансу та рівняння закону Дальтона. Для розрахунку температури горіння ці рівняння необхідно доповнити рівнянням енергетичного балансу топкового пристрою. У даній статті приведені результати розрахункових досліджень процесу горіння природного газу Шебелинського родовища у вихлопних газах топкових пристроїв наступного складу: $CH_4 = 94{,}1$, $C_2H_6 = 3{,}1$, $C_3H_8 = 0{,}6$, $C_4H_{10} = 0{,}2$, $C_5H_{12} = 0{,}8$, $N_2 = 1{,}2$.

Для опису рівноважної багатокомпонентної гетерогенної реагуючої системи потрібно задати два скінчених списки [4]:

- список d речовин, що беруть участь у реакціях - A_i, $i = \overline{1,d}$, що включають речовини q в атомарному стані, f речовин у молекулярному стані так що $q+f = d$;

- список D реакцій між d речовинами A_i, що задаються стехіометричною матрицею $\|\nu\|$:

$$\sum_{i=1}^{d} \nu_{ji} A_i = 0;\ j = \overline{1,D} \tag{2}$$

Якщо в якості одного з допущень прийняти, що система являє собою суміш ідеальних газів, даному наборові реакцій відповідно до термодинамічного закону діючих мас однозначно відповідає D рівнянь дисоціації [2]:

$$\prod_{i=1}^{d} P_i^{\nu_{ij}} = K_j;\qquad j = \overline{1,D}, \tag{3}$$

де P_i - парціальний тиск i-й речовині в суміші; K_j - константа рівноваги j-й реакції;

та q рівнянь закону збереження маси, записуваного для кожного σ - го елемента у складі вихідної речовини:

$$\sum_{i=1}^{d} a_{i\sigma} P_i = M_T (b_\sigma^T + \alpha \cdot \chi \cdot b_\sigma^o);\qquad \sigma = \overline{1,q} \tag{4}$$

де $a_{i\sigma}$ - елемент атомарної матриці $\|a\|$, що показує число атомів σ-го елемента в i -й речовині; b_σ^T, b_σ^o - число молів σ- го елемента відповідно у паливі та окислювачі; χ - мольний стехіометричний коефіцієнт; M_T - число молів вихідної речовини.

Таким чином, запису рівноважного багатокомпонентного процесу у виді (2) відповідає математична модель, що складається з $D+q$ нелінійних рівнянь (3) і (4), а також рівняння закону Дальтона:

$$\sum_{i=1}^{q+f} P_i = P, \tag{5}$$

де P - тиск суміші газів.

Використання списку реакцій (2) застосовуються рекомендації і стехіометричні рівняння, приведені в роботі [1, 4, 5], яким відповідає математична модель виду (3)...(5), що дозволяє розрахувати 12 - ть найбільш ймовірних компонентів продуктів згорання: CO_2, CO, O_2, H_2, H_2O, OH, NO, N_2, C, O, H, N. З них CO, O_2, H_2 визначають економічність процесу згорання, CO, NO - його токсичність.

Матриця стехіометричних коефіцієнтів $\|\nu\|$ і рівнянь дисоціації, що відповідають обраному спискові реакцій, представлені у таблиці 1. Атомарна матриця $\|a\|$ - у таблиці 2.

Число молів b_σ^T та b_σ^o у випадку завдання рідкого палива ваговими частками хімічних елементів (табл. 1) розраховується при виборі умовної молекулярної маси паливної і повітряної суміші [4] за формулами:

$$b_\sigma^T = \sum_{i=1}^{n} \frac{M^{усл}}{M_\sigma} \cdot g_{i\sigma}^T \cdot a_{i\sigma}^T, \tag{6}$$

$$b_\sigma^o = \sum_{i=1}^{m} \frac{M^{усл}}{M_\sigma} \cdot g_{i\sigma}^o \cdot a_{i\sigma}^o, \qquad \sigma = \overline{1,q}\ , \tag{7}$$

де $g_{i\sigma}^T$, $g_{i\sigma}^o$ - вагові частки σ - го елемента в i – й речовини відповідно у паливі й окислювачі; $M^{усл}$ - умовна молекулярна маса палива й окислювача; M_σ - атомна маса σ - го елемента; n, m - кількість речовин відповідно у паливі й окислювачі, що містять σ - й елемент; $a_{i\sigma}^T$, $a_{i\sigma}^o$ - кількість атомів σ - го елемента в i - й речовині, що входить відповідно у паливо й окислювач.

Мольний стехіометричний коефіцієнт найбільш зручно визначити за універсальною формулою [5]:

$$\chi = \frac{\sum_{\sigma=1}^{k} b_\sigma^T \cdot \chi_\sigma}{\sum_{\sigma=1}^{k} b_\sigma^o \cdot \chi_\sigma}\ , \tag{8}$$

де χ_σ - валентність σ - го елемента; k - кількість елементів, що реагують при горінні палива.

Значення констант дисоціації K_j , що входять у рівняння (3), звичайно задаються інтерполяційними формулами в залежності від температури, тому в розглянутій моделі до системи рівнянь хімічної рівноваги (3)...(8) додається рівняння енергетичного балансу топки [6], що дозволяє визначити адіабатичну температуру горіння:

$$Q_H^P + Q_b - Q_з + C_{ПГ} \cdot r \cdot V_Г \cdot t_{гр} = C_{ПГ} \cdot V_Г \cdot t_{ад} \tag{9}$$

де Q_H^P - нижча теплота згорання палива; Q_b - тепло, внесене в топку окислювачем; $Q_з$ - втрата тепла з хімічною неповнотою згорання; $C_{ПГ}$ - об'ємна теплоємність продуктів згоряння; $V_Г$ - обсяг димових газів; $t_{ад}$ - адіабатична температура горіння, r - коефіцієнт рециркуляції; $t_{гр}$ - температура газів рециркуляції.

Докладний опис складових рівняння (9) приведено в нормативному методі розрахунку котлових агрегатів [6].

Оскільки теплоємність продуктів згорання $C_{ПГ}$ залежить від заданої температури $t_{ад}$, рівняння (9) вирішується ітераційним методом.

Після розрахунку адіабатичної температури горіння, визначається максимальна температура смолоскипа за формулою [7] :

$$T_{ПГ} = \frac{0.735}{B_0^{0.09}}(t_a + 273) \tag{10}$$

де B_0 - критерій Больцмана, що визначається з вираження [7]:

$$B_0 = \frac{3.62 \cdot 10^{-11}}{C_{ПГ} \cdot d_Г \cdot b}(t_a + 273)^3 \tag{11}$$

де $d_Г$ - діаметр амбразури пальника, м.

 ISBN 7-776-8361-7

Таблиця 1

Матриця стехіометричних коефіцієнтів реакцій горіння та рівняння дисоціації

Речовина, елемент													Відповідні реакціям горіння рівняння дисоціації
Елемент	CO_2	CO	O_2	H_2	H_2O	C	NO	N_2	C	H	O	N	
CO_2	-2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$P_{CO}^2 \cdot P_{O_2} \cdot P_{CO_2}^{-2} - K_1 = 0$
H_2O	0	0	0	-1	-2	2	0	0	0	0	0	0	$P_{H_2} P_{H_2O}^{-2} P_{OH} - K_2 = 0$
H_2O	0	0	1	2	-2	0	0	0	0	0	0	0	$P_{H_2} P_{H_2O} P_{O_2} - K_3 = 0$
H_2	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	2	0	0	$P_{H_2}^{-1} P_H^2 - K_4 = 0$
O_2	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	$P_{O_2}^{-1} P_O^2 - K_5 = 0$
NO	0	0	1	0	0	0	-2	1	0	0	0	0	$P_{O_2} \cdot P_{NO}^{-2} P_{N_2} - K_6 = 0$
N_2	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	2	$P_{N_2}^{-1} P_N^2 - K_7 = 0$
CO	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	$P_{CO}^{-1} \cdot P_C \cdot P_O - K_8 = 0$

Таблиця 2

Атомарна матриця регулюючий системи, що наведена у таблиці 1

Елемент	Речовина, елемент											
	CO_2	CO	O_2	H_2	H_2O	C	NO	N_2	C	H	O	N
C	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
H	0	0	0	2	2	1	0	0	0	1	0	0
O	2	1	2	0	1	1	1	0	0	0	1	0
N	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	1

Параметр *b* знаходиться з рівняння[7]:

$$b = 16 \cdot \sqrt[3]{\omega_Г} \cdot \frac{273}{t_a + 273} \qquad (12)$$

де $\omega_Г$ - швидкість повітря в амбразурі пальника, приведена до 273 К, м/с.

$$\omega_Г = \frac{G_B}{\pi \cdot d_{Г^2}} \qquad (13)$$

де G_B - витрата повітря, що визначається з виразу:

$$G_B = \frac{B_Г \cdot \alpha \cdot V^0}{l} \qquad (14)$$

де $B_Г$ - витрата палива, м^3/с; *l* - число пальників.

При максимальній температурі продуктів згорання у смолоскипі розраховуються значення K_j . Рішення системи рівнянь (3)…(12) дозволяє визначити рівноважні концентрації продуктів згорання C_i .

Рішення системи рівнянь енергетичного балансу виконується методом Мюллера і дозволяє оцінити адіабатичну температуру горіння. Температура в ядрі полум'я $T_{ПГ}$ визначається за алгоритмом В.А. Крутієві [7].

Табличні дані залежності констант дисоціації від температури апроксимовані багатоступеневими поліномами. Коефіцієнти поліномів визначається методом найменших квадратів.

Після оцінки значень констант дисоціації здійснюється розрахунок складу продуктів згорання методом Ньютона.

За допомогою моделі, проведено розрахункове дослідження процесу горіння палива з рециркуляцією димових газів та у повітрі при однакових умовах роботи топкового пристрою.

Досліджено вплив на склад продуктів згорання співвідношення "паливо - окислювач", при різних коефіцієнтах витрати окиснення. Результати приведені на рис.1, 2 за групами компонентів.

На рисунку 1 показана зміна складу компонентів, що характеризують економічність процесу горіння при перемінному коефіцієнті витрати окислювача.

У діапазоні $\alpha > 1$ мається залишкова концентрація продуктів неповного згорання (CO, H_2), що обумовлено явищем дисоціації. Їхнє догорання відбувається дуже повільно, незважаючи на наявність надлишкового кисню, причому кількість CO та H_2 при горінні з рециркуляцією димових газів мало відрізняється від згорання палива у повітрі.

Однак спостерігається й істотна відмінність. Процес повного згорання природного газу з рециркуляцією димових газів зміщується убік дещо більших значень коефіцієнта витрати окислювача ($\alpha = 1.08$) у порівнянні з горінням у повітрі. Ймовірний вмісту надлишкового кисню при $\alpha > 1{,}1$ у 2, 4 рази нижче змісту кисню при горінні у повітрі.

Вміст окису азоту з рециркуляцією димових газів у порівнянні з горінням у повітрі знижується в 2-4 рази в залежності від значення коефіцієнта витрати окислювача. Це можна пояснити падінням температури горіння та кількості надлишкового кисню у газах, що виходять з топкових пристроїв.

Наведені дослідження показали, що умови оптимального згорання природного газу з рециркуляцією продуктів згорання при мінімізації топкових втрат та токсичності димових газів суттєво відрізняються від горіння у чистому повітрі: процес повного згорання "зміщується" убік дещо більших значень коефіцієнта витрати окислювача за рахунок зменшення концентрації кисню у продуктах згорання, при цьому викиди токсичних компонентів суттєво знижуються, наприклад, концентрація оксиду азоту знижується у 3...4 рази, концентрація двооксиду вуглецю – на 8...12 відсотків.

 ISBN 7-776-8361-7

Різний характер зміни концентрацій компонентів димових газів від коефіцієнтів надлишку повітря та рециркуляції вимагає більш ретельного вибору режиму горіння, точного визначення оптимального управління, як що порівнювати його з горінням у чистому повітрі, що у кожному окремому випадку обирається рішенням задачі оптимізації.

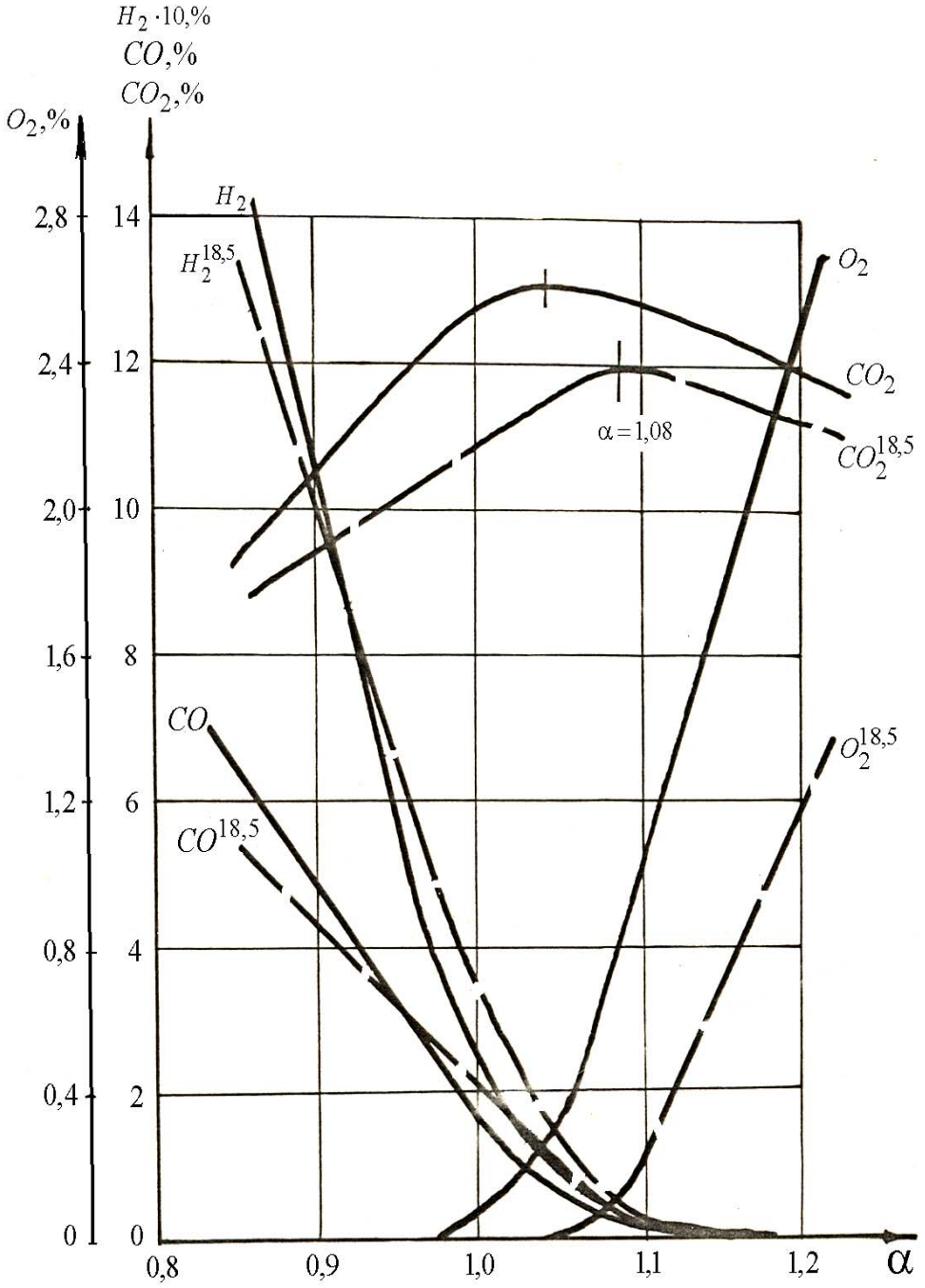

Рис. 1 Зміна складу компонентів, що характеризують економічність процесу горіння при перемінному коефіцієнті витрати окислювача

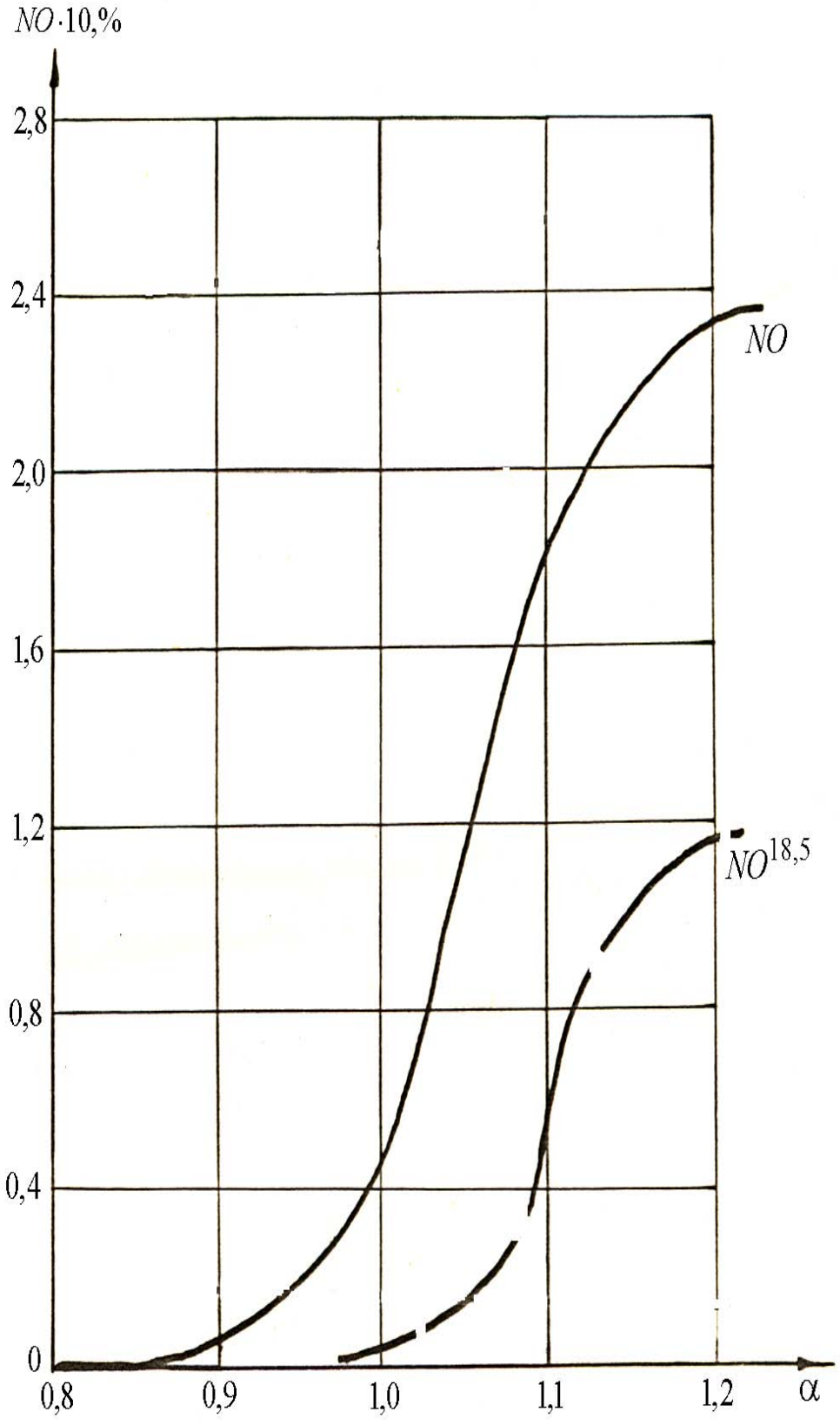

Рис. 2 Зміна складу окису азоту у продуктах спалення при перемінному коефіцієнті витрати окислювача

 ISBN 7-776-8361-7

The article deals with the process of burning of the natural gas with the recirculation of products of combustion on the basis of solutions of the accepted system of equations of chemical thermodynamics which allows to define rather a detailed composition of smoke gases. The results allow to solve the questions of control of the process of burning on the basis of the generalized ecological economic criterion of optimization.

1. Цирульников Л.М. О возможности оптимизации топочного процесса в газомазутных котлах. – Теплоэнергетика, 1979, №6, с. 52-54.

2. Рыжиков Ю.Г., Тодорцев Ю.К. Минимизация токсичности выбросов при управлении сжиганием мазута в топках паровых котлов. Сб. научных трудов №109. – М. Моск. энерг. ин-т, 1986. С. 44-50.

3. Киреев В.А. Методы практических расчетов в термодинамике химических реакций. – М. Химия, 1975.

4. Лушпа А.И. Основы химической термодинамики и кинетики химических реакций. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.

5. Алемасов В.Е. Теория ракетных двигателей. – М.: Гостехиздат, 1963, - 476 с.

6. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). Под ред. Кузнецова и др. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.

7. Офердиев Т.Б. Образование оксидов азота в газомазутных парогенераторах. – Теплоэнергетика, 1975, № 9