

ВПЛИВ СТАДІЙНОГО СПАЛЮВАННЯ МЕТАНУ НА УТВОРЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ

А. П. Чорний^{1, а}, С. Г. Кобзар², С. М. Пономаренко¹

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

²Інститут технічної теплофізики НАН України

Анотація

В роботі виконано дослідження стадійного спалювання метану та досліджено вплив стадійного горіння на утворення оксидів азоту за допомогою модельного реактора CPR. Знайдено оптимальне положення отвору в реакторі для подачі вторинного повітря, при якому спостерігатиметься найнижче значення NO_x в продуктах на виході з камери згорання.

Ключові слова: оксиди азоту NO_x, стадійне горіння, механізм горіння, хімічний недопал.

Вступ

Процеси горіння рідких, твердих і газоподібних палив широко використовуються практично у всіх галузях сучасної техніки і технології, незважаючи на те що ми розробляємо і все частіше використовуємо установки що працюють на відновлювальних джерелах енергії, позбутися апаратів в які виробляють енергію спалюючи паливо, ми зможемо ще не скоро. Оксиди азоту NO_x, оксид вуглецю CO і сірчистий ангідрид SO₂ – найпоширеніші токсичні сполуки, що викидаються в атмосферу під час спалювання органічного палива в котлах. Найбільш поширеними методами зниження оксидів азоту є:

- Організація процесів горіння:
 - 1) закрутка потоку,
 - 2) рециркуляція частини димових газів,
 - 3) двостадійне спалювання,
 - 4) reburning (тристадійне спалювання).
- Очистка продуктів згорання.
 - 1) Селективне каталітичне відновлення – засноване на реакції відновлення оксидів NO_x амоніаком до азоту і води за температури вище 232°С на поверхні каталізаторів:

$$4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \longrightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$$

$$2\text{NO}_2 + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \longrightarrow 3\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}.$$
 До найбільш поширених каталізаторів відносяться оксид V₂O₅, нанесений на поверхню TiO₂ (ефективна температура 300 – 450°С), молекулярні цеоліти 300 – 600°С), а також дорогоцінні метали 200 – 300°С), які однак застосовуються досить рідко через велику ймовірність їхнього отруєння.
 - 2) Селективне некаталітичне відновлення – проводиться за участі водню, вуглеводнів, монооксиду вуглецю в умовах недостатньої

кількості кисню за температури вище 850 – 1175°С.

Робота присвячена дослідженню впливу двостадійного спалювання метану на утворення оксидів азоту.

1. Об'єкт дослідження і комп'ютерна модель

В якості об'єкту дослідження використовувався модельна камера згорання CPR яка експериментально досліджувалась в роботах [1, 2]. CPR – це 150 кВт, циліндричний, реактор з внутрішнім діаметром 0.80 м і довжиною 2.40 м.

Для дослідження побудована комп'ютерна модель в програмі ANSYS Design Manager, яка показана на (рис. 1). Граничні та початкові умови показано в таблиці 1.

Табл. 1. Граничні умови та витрати газу та повітря

Параметр	Значення
Коефіцієнт надлишку повітря, α	1.05
Витрата природного газу, (кг/с)	0.0027
Витрата повітря, (кг/с)	0.0488
Температура повітря на вході, (К)	298
Температура на стінці, (°С)	1000
Геометричне число закрутки S	1.5
Вхідна шв. первинної суміші, (м/с)	5
Вхідна шв. вторинного повітря, (м/с)	5

2. Теоретична модель

Горіння вуглеводневих сумішей, зокрема метану в повітрі, є складним процесом, для пояснення закономірностей і визначення характеристик якого, необхідно враховувати кінетику багатьох стадій ланцюгових реакцій, що при цьому протікають. Досліджуючи залежності швидкості полум'я в метано-

^аandruhas22@gmail.com

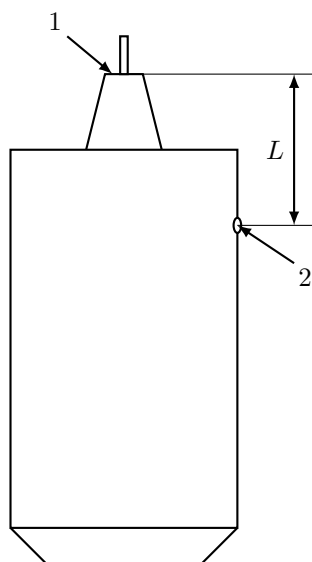


Рис. 1. Модель побудована в ANSYS Design Manager: 1 – положення отвору для подачі основного повітря, 2 – положення отвору для подачі вторинного повітря.

повітряних сумішах від тиску, коефіцієнту надлишку окисника і температури палива, С. К. Westbrook та F. L. Dryer [3] запропонували простий метод визначення характеристик горіння, який полягає в підборі параметрів швидкості реакції в законі Арреніуса:

$$k = AT^n e^{-\frac{E}{RT}} [\text{Fuel}]^a [\text{Oxidizer}]^b \quad (1)$$

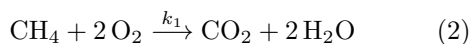
таким чином, щоб вони співпадали з експериментально визначеною швидкістю ламінарного полум'я суміші (далі, механізм хімічної кінетики WD, або метод WD).

Визначивши таким чином характеристики горіння (наприклад, швидкість поширення полум'я) при стехіометричному співвідношенні та атмосферному тиску, потім вже можна робити моделювання при інших значеннях коефіцієнта стехіометричності та тиску.

Як було показано авторами, такий підхід правильно відтворює експериментальні значення границь поширення полум'я та залежність швидкості поширення полум'я від тиску і коефіцієнта стехіометричності.

Для розрахунку параметрів горіння на основі методу WD зазвичай використовуються три механізми горіння метану:

- 1) одноступеневий механізм горіння, який протікає згідно реакції



- 2) двоступеневий механізм горіння, який протікає згідно реакцій

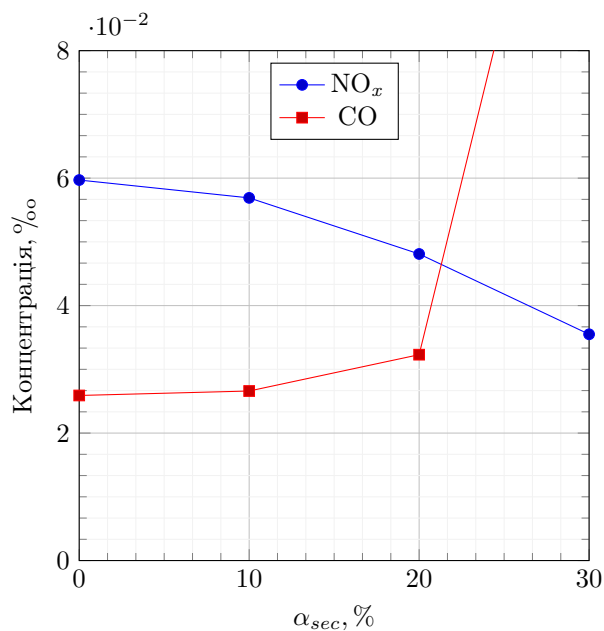
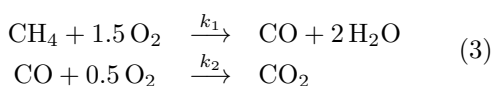
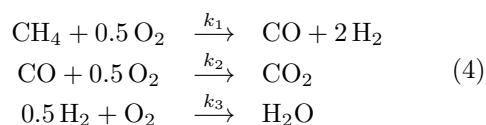


Рис. 2. Залежність концентрації CO та NO_x від α_{sec} .

- 3) триступеневий механізм горіння, який протікає згідно реакцій



Одноступеневий механізм (2) зазвичай використовується для попереднього аналізу об'єктів, що досліджуються.

Для дослідження за допомогою методу WD нами було обрано двоступеневий механізм горіння, який забезпечує достатню точність при задовільних витратах машинного часу. Параметри рівняння (1) для методу WD [3] які були використані при моделюванні, показані в таблиці 2.

Верифікація було проведено в роботі[4].

3. Результати дослідження

Моделювання процесу горіння метану відбувалось за допомогою комплексу ANSYS CFX. В процесі моделювання змінювалося відсоток подачі повітря з основного α_{burn} та вторинного каналу α_{sec} , при постійному значенні параметру $L = 0.3$ (рис. 1).

В таблиці 3 наведені результати моделювання процесу горіння метану в модельній камері згорання при різних значеннях параметру α_{sec} та α_{burn} .

За даними таблиці 3 для побудовано графік 2. Видно що зниження викидів оксидів азоту відбувається за рахунок хімічного недопалу палива.

На рис. 3 показано як коефіцієнт α_{sec} впливає на течію в камері згорання.

Аналіз даних показує, що оптимальне зменшення оксидів азоту в камері згорання досягається при $\alpha_{sec} = 30\%$. Проте такий результат досягнуто за рахунок хімічного недопалу палива. Тому тут необхідні більш детальні дослідження для виявлення кращого значення α_{sec} при якому буде збережено баланс між хімічним недопалом CO та викидами оксидів азоту NO_x .

Табл. 2. Параметри рівняння (1) для методу WD [3]

Реакція	A	n	E_a , кДж/моль	Порядок реакції
$\text{CH}_4 + 1.5 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2 \text{H}_2\text{O}$	1.590×10^{13}	0	200.46	$[\text{CH}_4]^{0.7} [\text{O}_2]^{0.8}$
$\text{CO} + 0.5 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	3.980×10^{14}	0	170.94	$[\text{CO}] [\text{O}_2]^{0.25} [\text{H}_2\text{O}]^{0.5}$

Табл. 3. Порівняння концентрацій досліджуваних речовин при різних значеннях параметру α_{sec}

α_{burn} , %	100	90	80	70
α_{sec} , %	0	10	20	30
$[\text{NO}_x]$, 10^{-2} ‰	5.97	5.69	4.81	3.55
$[\text{CO}]$, 10^{-2} ‰	2.59	2.66	3.23	14.09

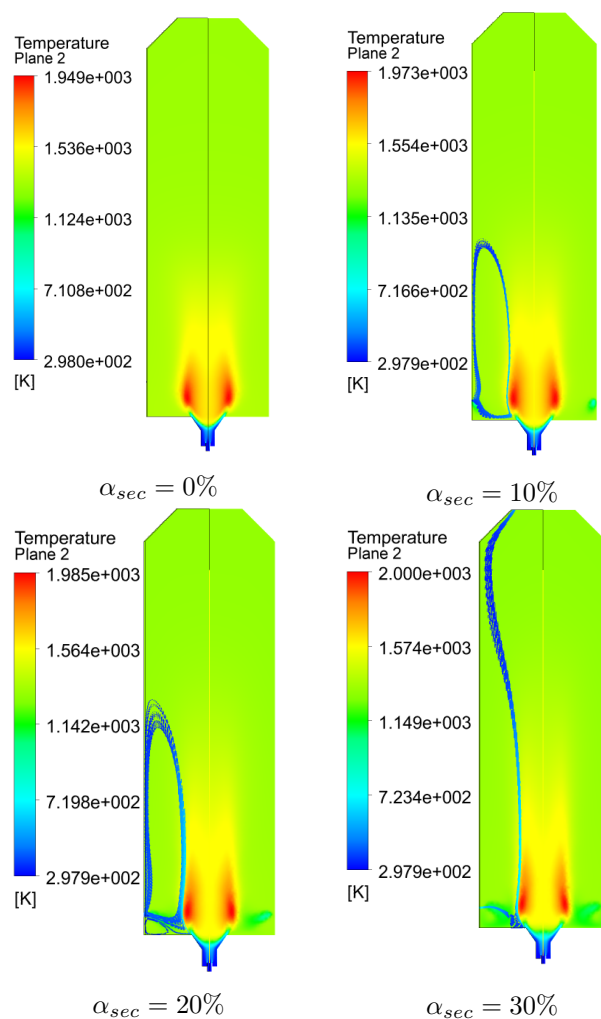


Рис. 3. Вплив на течію при різних значеннях параметру α_{sec} .

Висновки

Дослідження за допомогою пакету прикладних програм ANSYS CFX впливу стадійного горіння метану на утворення оксидів азоту в модельній камері згорання при різних значеннях коефіцієнту подачі вторинного повітря $\alpha_{sec} = 30\%$ показало що, стадійне спалювання метану – дозволяє знизити концентрацію оксидів азоту та хімічний недопал в продуктах згорання на виході з камери. Отримано, що оптимальне положення отвору для подачі вторинного повітря відповідає $L = 0.3$ м. В цьому випадку:

- 1) досягається зниження емісії оксидів азоту на 40.53 %.
- 2) досягається збільшення хімічного недопалу на 444 %.

Перелік використаних джерел

1. Boardman R. D., Eatough C. N., Germane G. J. & L. D. Comparison of Measurements and Predictions of Flame Structure and Thermal NO_x , in a Swirling, Natural Gas Diffusion Flame // Combustion Science and Technology. – 1993. – Vol. 93. – P. 193–208.
2. Smoot A. M. L.D., Hill S. C., Eatough C. N. Components, formulations, solutions, evaluation, and application of comprehensive combustion models // Progress in Energy and Combustion Science. – 1986. – Vol. 25. – P. 387–436.
3. Westbrook C. K., Dryer F. L. Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames // Combustion Science and Technology. – 1981. – Vol. 27. – P. 31–43.
4. Чорний А. П., Кобзар С. Г., Пономаренко С. М. Вплив закрутки потоку на утворення оксидів азоту // XIV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених. – 2016. – Т. 1. – С. 136.