

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»,
Фізико-технічний інститут

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, число закрутки потоку

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 пальне ми зможемо ще не скоро. Оксиди азоту NO_x , оксид вуглецю CO і сірчистий ангідрид SO_2 – 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 $232^\circ C$ на поверхні каталізаторів:

$$4NO + 4NH_3 + O_2 \longrightarrow 4N_2 + 6H_2O$$

$$2NO_2 + 4NH_3 + O_2 \longrightarrow 3N_2 + 6H_2O.$$
 До найбільш поширених каталізаторів відносяться оксид V_2O_5 , нанесений на поверхню TiO_2 (ефективна температура $300 - 450^\circ C$), молекулярні цеоліти $300 - 600^\circ C$), а також дорогоцінні метали $200 - 300^\circ C$), 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 $850 - 1175^\circ C$.

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 яка експериментально досліджувалась в роботах [1, 2].

CPR це 150 кВт, циліндричний, реактор з внутрішнім діаметром 0.80 м і довжиною 2.40 м (рис. 1). Закрутка передається в потік вторинного повітря з використанням рухомого блоку генератора завихрення. Граничні та початкові умови показано в таблиці 1.

Комп'ютерна модель побудована в ANSYS Design Manager, показані на (рис. 2).

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, ($^\circ C$)	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 за-

^аandruhas22@gmail.com

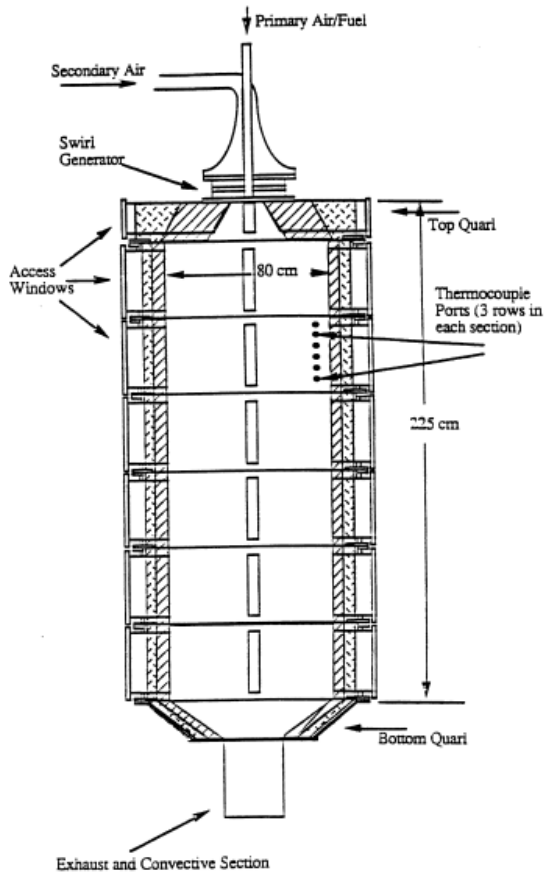


Рис. 1. Модель Controlled Profile Reactor. Рисунок взятий з роботи [1]

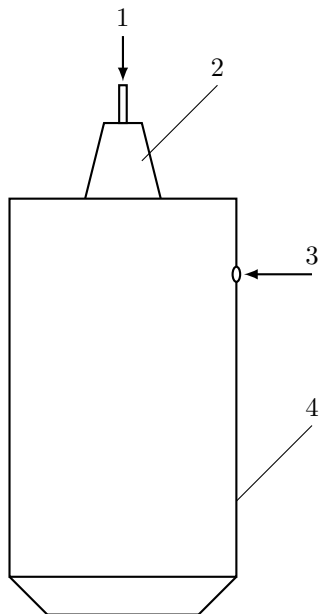


Рис. 2. Модель побудована в ANSYS Design Manager: 1 – подача горючої суміші, 2 – дифузор, 3 – подача вторинного повітря, 4 – стінка

кономірностей і визначення характеристик якого, необхідно враховувати кінетику багатьох стадій ланцюгових реакцій, що при цьому протікають. Досліджуючи залежності швидкості полум'я в метано-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:

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

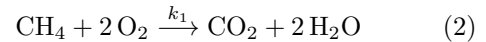
таким чином, щоб вони співпадали з експериментально визначеною швидкістю ламінарного полум'я суміші (далі, механізм хімічної кінетики WD, або метод WD).

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.

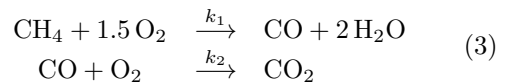
Як було показано авторами, такий підхід правильно відтворює експериментальні значення границь поширення полум'я та залежність швидкості поширення полум'я від тиску і коефіцієнта стехіометричності.

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

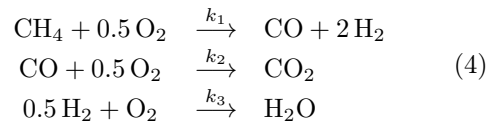
- 1) одноступеневий механізм горіння, який протікає згідно реакції



- 2) двоступеневий механізм горіння, який протікає згідно реакцій



- 3) тріступеневий 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 показані в таблиці 2.

У таблиці 2 представлені значення коефіцієнтів виразу закону Арреніуса(1) [3] які були використані при моделюванні.

Верифікація було проведено в роботі [4].

3. Результати дослідження

Моделювання процесу горіння метану відбувалось за допомогою комплексу ANSYS CFX. В процесі моде-

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	$[\text{CO}][\text{O}_2]^{0.25}[\text{H}_2\text{O}]^{0.5}$

лювання змінювалося положення отвору для подачі вторинного повітря, параметр L (рис. 3).

В таблиці 3 наведені результати моделювання процесу горіння метану в модельній камері згорання при різних значеннях параметру L .

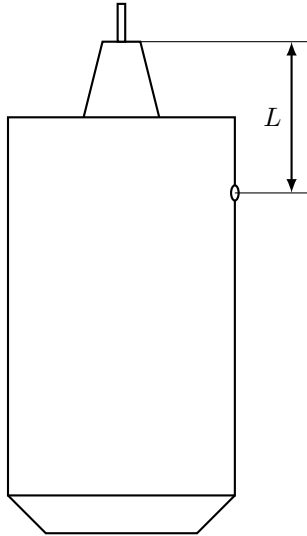


Рис. 3. Положення отвору для подачі основного повітря

Табл. 3. Порівняння досліджуваних величин при різних значеннях параметру L

L , м	NO_x , ‰	CO , ‰
–	5.23	41.22
0.5	4.88	38.30
0.6	6.80	39.90
0.7	6.14	46.60

З даних таблиці 3 видно що, оптимальне положення отвору для подачі вторинного повітря для даної геометрії та розглянутих режимних параметрів, знаходиться в околі значення $L = 0.5$ м. Більш детальне варіювання параметрів дозволить уточнити оптимальне положення отвору, при якому концен-

трація NO_x та CO в продуктах згорання на виході з реактора буде мінімальною. Однак, вже навіть при значеннях $L = 0.5$ м можна помітити зниження концентрації NO_x та CO на виході з камери згорання при стадійному горінні.

Висновки

Дослідження за допомогою пакету прикладних програм ANSYS CFX впливу стадійного горіння метану на утворення оксидів азоту в модельній камері згорання при різних геометричних положеннях отвору для подачі вторинного повітря 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 $L = 0.5$ м. В цьому випадку:

- 1) досягається зниження емісії оксидів азоту на 7.11 %.
- 2) досягається зниження хімічного недопалу на 7.62 %.

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.