

ВПЛИВ РОЗМІРУ ВУГІЛЬНИХ ЧАСТИНОК НА ПРОЦЕС ЇХ ГОРІННЯ У СУМІШІ МЕТАНУ ТА ПОВІТРЯ

Б. М. Полванов^{1, а}, С. М. Пономаренко¹, С. Г. Кобзар²

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

²Інститут технічної теплофізики НАН України

Анотація

Стаття присвячена питанню ефективного спалювання пилоподібного вугільного палива у суміші з газами, яка подається у проточний реактор. В результаті аналізу показано, що розміри вугільних частинок впливають на екологічність та ефективність процесу горіння. Також було продемонстровано, що метаноповітряна суміш збільшує екологічність та коефіцієнт корисної дії реакторної установки.

Ключові слова: процес горіння, вугільний пил, метан, повітря

1. Вступ

На сьогодні використання процесів горіння з метою отримання енергії відіграє визначальну роль в енергетиці та інших галузях промисловості. Так, близько 80 % всієї енергії, що виробляється в даний час в світі, припадає на паливну енергетику.

Одним з видів викопного палива, який використовується в паливній енергетиці, поряд з природним газом, є вугілля. За рахунок його подрібнення, воно легше займається і краще горить, крім того має низьку ціну і велику теплоту виділення. Дослідження процесу горіння вугільного пилу має на меті пошук оптимального способу його спалювання як з економічної, так і з екологічної точки зору. Однак, в експериментальних дослідженнях важко відтворювати процес горіння в умовах, близьких до таких, що відбуваються в топці енергетичної установки, тому, для більш повного врахування складних умов горіння плідним може бути залучення методів комп'ютерного моделювання.

2. Властивості та класифікація вугілля

Вугілля — це вид палива, утворений шляхом вуглефікації залишків рослин. Вугілля за природою походження поділяють на: гуміти, сапропеліти, ліптобіоліти. Гуміти є найбільш розповсюджуваним типом у світі. Вони являють собою вуглець, який містить невелику кількість смоли та кутину (воску).

Ліптобіоліти в основному складаються з смоли та кутину. Гуміти та ліптобіоліти походять від нижчих рослин. Спропеліти являються найчистішим типом вугілля. Даний вид походить також від нижчих рослин. В промисловості існують три категорії вугілля: кам'яне вугілля, буре вугілля, антрацити.

Всі види вугілля, які зустрічаються в природі являються складними речовинами в органічний склад яких входять вуглець, вода, кисень, азот, зола та інші. Для характеристики складу вугільної пилі використовують відсоткове співвідношення. Склад органічної маси не визначає в достатній мірі характеристики вугілля. На практиці, знання складу вугілля являється достатньою умовою для розрахунку основних термодинамічних характеристик [1].

До важливих термодинамічних характеристик вугілля відносяться питому теплоємність, теплопровідність, теплоту розкладання та коефіцієнт теплового розкладання. Питому теплоємність залежить від вологості вугілля. Також, наявність вугільних домішок або золи впливає на теплоємність.

Теплопровідність — це величина, яка визначає здатність тіла проводити тепло. Чим вона більша тим швидше тіло проводить тепло. На дану характеристику впливає фізичний стан частинки — подрібнений або суцільний. Вугільні частинки не є теплоізоляторами. Їхня провідність зменшується з зростом температури. На теплопровідність впливає пористість структури. Чим менша кількість пор, тим менша теплопровідність [2]

При нагріванні вугілля в повітряному середовищі відбувається термічна деструкція вугілля. Термічна деструкція — це процес виділення газоподібних речовин при нагріванні палива. Продуктами реакції є летючі речовини та твердий залишок. Твердий залишок, який утворюється при розкладанні палива називається коксовим залишком. Разом з летючими речовинами з вугілля видаляється волога, а у твердому залишку залишається зола. Вихід летючих в кам'яному вугіллі 8 – 50 мас. %. В бурому вугіллі вихід летючих складає 45 – 55 мас. %. Найбільший вихід летючих в сапропелітів 60, 53 – 86, 17 мас. %.

^аbogdan.polvanov@gmail.com

Процес займання вугільної частинки залежить від її діаметру та ступеня вологості. Оскільки процес окиснення відбувається з виділенням теплоти, то енергія може як накопичуватися в середині частинки, так і розсіюється в просторі. Внаслідок накопичення тепла може відбутися самозаймання. Цей процес найгірше проходить у сухому вугіллі, а найефективніше у вологому. Також, основною умовою самозаймання являється розмір частинок. Великі куски майже не самозаймаються. Маленькі частинки найкраще піддаються процесу горіння. Відчутно впливає на процес горіння вміст кисню та теплопровідність палива [1].

3. Горіння вугільної частинки в повітрі

Розглянемо процес горіння вугільної частинки в замкненому повітряному середовищі з концентрацією повітря c_0 на яке діє джерело теплового випромінювання. Нехай, на частинку подається турбулентний потік. Вважаємо, що реакція окиснення проходить на сферичній поверхні. Обмін теплом відбувається конвекцією та теплопровідністю [3].

Вважатимемо, що діаметр частинки під час горіння зменшується, тобто вплив золи відсутній. Це спрощує рівняння математичної моделі, що описують процес, оскільки зола перешкоджає дифузії повітря до поверхні частинки. Також, нехтуємо розбуханням частинок під час горіння [4].

В початковий момент часу температура середовища більша за температуру частинки. Під час нагрівання на поверхні палива відбуватиметься процес виходу летючих речовин. Внаслідок цього процесу з неї виходять летючі гази, які реагують в газовій фазі, а коксова маса — в гетерогенному режимі [3].

Горіння та газифікація є дуже схожими хімічними процесами, які протікають зі сполученням кисню та вуглецю, але між ними існує й деяка відмінність, яка полягає в тому, що хімічне тепло палива під час газифікації переходить в хімічне тепло займистих газів.

Взаємодія вуглецю з киснем є найголовнішою реакцією горіння вугільної частинки. Це пов'язано з тим що коксова частина палива займає більшу частину маси твердого палива. Також, реагування коксового залишку є найдовшою стадією та являється основним джерелом тепловиділення [5].

Процес горіння вугільної частинки можна поділити на декілька послідовних етапів рис. 1:

- Етап 1
 $\text{coal} \longrightarrow \text{C(s)} + \text{CO} + \text{CO}_2$
- Етап 2
 $2 \text{CO} + \text{O}_2 \longrightarrow 2 \text{CO}_2$
 $\text{CO}_2 + \text{C} \longrightarrow 2 \text{CO}$
- Етап 3
Нагрівання коксового залишку
- Етап 4
 $2 \text{C(s)} + \text{O}_2 \longrightarrow 2 \text{CO}$
 $\text{C(s)} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2$

При горінні, як правило, вугільні частинки згорають не повністю, утворюється коксовий залишок

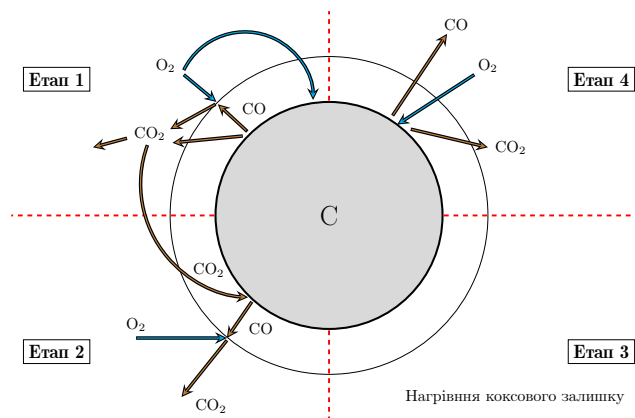


Рис. 1. Схема горіння вугільної частинки та CO. Продукти неповного згоряння називаються хімічним недопалом (ХН). Також утворюється зола.

4. Геометрична 3D-модель

В якості об'єкту дослідження використовується Controlled Profile Reactor (CPR) рис. 2, який був розглянутий у роботах [6], [7]. Він представляє собою циліндричний ректор потужністю 0,5 МВт з внутрішнім діаметром 80 см і довжиною 240 см.

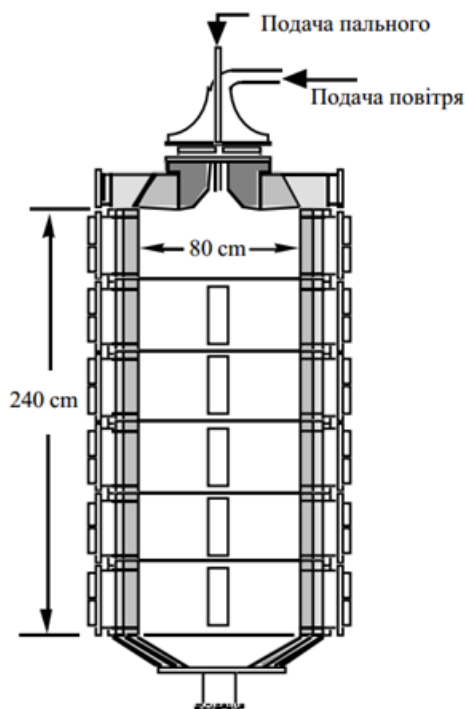


Рис. 2. Модель CPR [6], [7]

На вхід подається повітря, а через мале сопло вугільні частинки, які змішуючись з окислювачем утворюють суміш, яка загоряється. Через отвір з протилежного боку виходять продукти згоряння.

Моделювання процесу горіння виконувалося за допомогою студентської версії програми ANSYS FLUENT 19.2. Геометрія була побудована у SCMD 19.2.

5. Вхідні параметри моделі

Основною величиною відносно, якої відбувається визначення вхідних параметрів моделі є потужність. В даній роботі вона складає 0,5 МВт. Цей параметр дозволяє знайти витрату вугільних частинок. Для цього потрібно знати теплоту згоряння палива, яка розраховується за формулою:

$$Q_H^P = 339 \cdot C^P + 1256 \cdot H^P - 109(O^P - S_L^P) - 25,14 \cdot (9 \cdot H^P + W^P) = 35 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} \quad (1)$$

де C^P — масова концентрація карбону, яка складає 97 %, H^P — концентрація водню, яка складає 1 %, O^P — масова концентрація кисню, яка складає 1 %, S_L^P — масова концентрація сірки, яка складає 0 %, W^P — масова концентрація вологи, яка складає 10 %. Окрім рідкої фази у вугіллі присутня зола концентрацією 10 мас. %. Витрата палива складає:

$$G_C = \frac{P}{Q_H^P} = \frac{0,5 \text{ МВт}}{35 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}} = 0,0143 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (2)$$

Витрата повітря на один кілограм палива знаходиться по формулі:

$$L_{O_2} = 2,66 \cdot \frac{C^P}{100} + 7,94 \cdot H^P - 100 \cdot \frac{O^P}{100} = 3,3 \quad (3)$$

Тоді витрата повітря у нашому випадку складає:

$$G_{O_2} = \alpha \cdot G_C \cdot L_{O_2} = 0,0055 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (4)$$

де α — надлишок повітря, який дорівнює 1,15. Повітря буде подаватися з температурою 673 К.

Швидкість повітря на вході у сопло визначається по формулою:

$$v = \frac{G_{O_2}}{\pi \rho R^2} = 4,33 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (5)$$

де R — радіус вхідного сопла, яка складає 0,09 м, ρ — густина повітря при температурі 673 К, яка складає $0,504 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Температура на стінках у початковий момент часу складає 673 К.

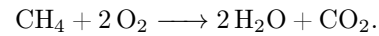
Для дослідження впливу метану на процес згоряння частинок вугілля різного діаметру було проведено дослідження з 1, 3, 6 та 10 мас. % метану від теплової потужності реактора.

Знайдемо вхідні параметри для метанової суміші. Вважатимемо, що загальна потужність реактора не міняється. Це означає, що при додаванні метану потрібно зменшити витрату вугільного палива таким чином, щоб загальна потужність їхнього горіння складала 0,5 МВт.

Початкова потужність горіння метану складає 150 кВт, а питома теплота дорівнює $50 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$, тоді витрата палива визначається за формулою:

$$G_{CH_4} = \frac{P_{CH_4}}{\lambda_{CH_4}} = 0,003 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (6)$$

Витрата повітря знаходиться за допомогою хімічного рівняння горіння метану:



З нього випливає:

$$G_{O_2} = 2 \cdot G_{CH_4} \cdot \frac{M_{O_2}}{M_{CH_4}} = 0,012 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (7)$$

6. Результати моделювання для горіння вугільного пилу в повітрі

Було змодельовано процес горіння вугільних частинок діаметрами 35–60 мк в повітрі. Для кожного розрахунку приймалося, що частинки мають однаковий діаметр.

Втрати теплоти при хімічному недопалі характеризуються величиною:

$$q = \frac{Q_{XH}}{Q}, \quad (8)$$

де Q — теплота, що виділяється при повному згорянні палива, Q_{XH} — теплота, що виділяється при згорянні коксового залишку та СО.

Результати обчислення показали, що втрати теплоти при хімічному недопалі зростають зі збільшенням діаметру частинок палива (рис. 3),

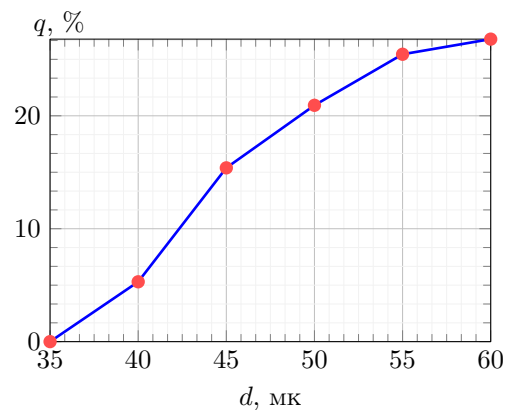


Рис. 3. Графік залежності втрати теплоти при хімічному недопалі від діаметру частинок

Максимальна температура моделі падає при збільшенні діаметру частинок (рис. 4) внаслідок збільшення хімічного недопалу.

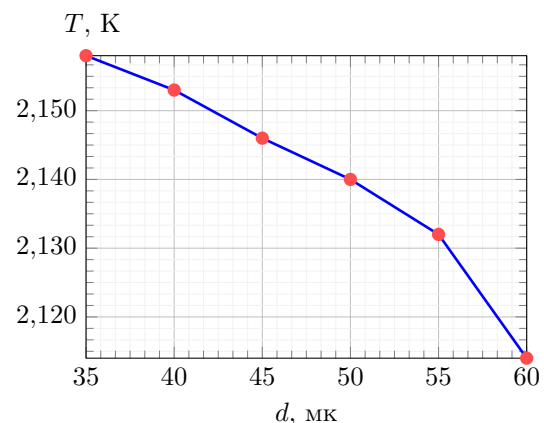


Рис. 4. Графік залежності максимальної температури від діаметру частинок

Емісія CO на виході з реактору зростає при збільшенні діаметру частинки (рис. 5).

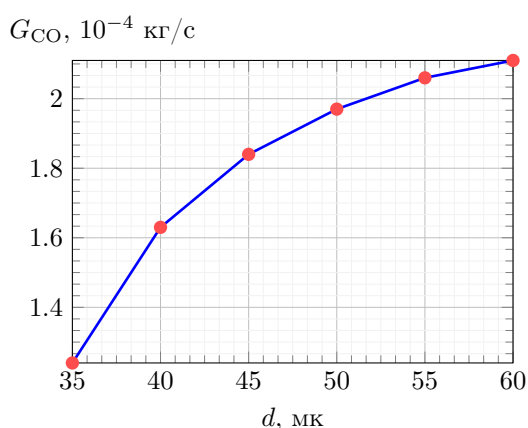


Рис. 5. Графік залежності емісії CO на виході від діаметру частинки

7. Результати моделювання для горіння вугільного пилу в метаноповітряній суміші

Для зменшення хімічного недопалу, на вхід у сопло реактора подають метаноповітряну суміш. Також, метан потрібно подавати у такій концентрації, щоб потужність реактора не збільшувалась. Це досягається шляхом зменшення маси вугільного пилу.

На рис. 6 зображена залежність втрати теплоти при хімічному недопалі при горінні частинок вугілля діаметром 55 мк в метаноповітряній суміші. З рисунку видно, що використання метану зменшує хімічний недопал, а отже, підвищує коефіцієнт корисної дії та ефективність установки.

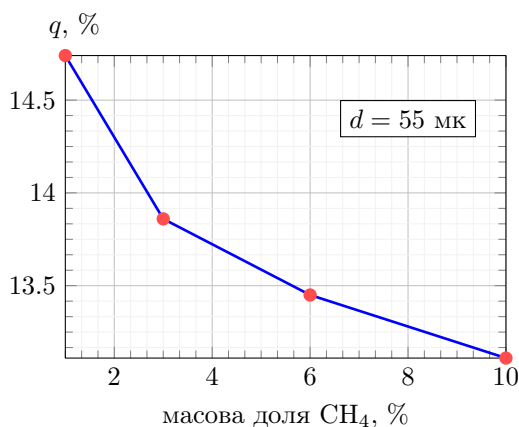


Рис. 6. Графік залежності втрати теплоти при хімічному недопалі від концентрації метану ($d = 55$ мк)

8. Висновок

Було досліджено процес горіння вугільного пилу в повітрі та метаноповітряній суміші.

Для випадку повітряної суміші було виявлено, що збільшення діаметру вугільних частинок впливає на зростання емісії CO, зменшує максимальну температуру та підвищує хімічний недопал.

Хімічний недопал збільшується при зростанні діаметру частинки. Максимальна температура навпаки зменшується.

Метаноповітряна суміш зменшує кількість незгорілого карбону на 8 % – 10 %, також приблизно в десять разів зменшує емісію CO при діаметрі частинки пилу, що дорівнює 55 мк.

Використання метану збільшує екологічність установки та коефіцієнт корисної дії ректора.

Перелік використаних джерел

1. Агроксин А. А. Химия и технология угля. — «Недра», 1969. — С. 240.
2. Русчев Д. Д. Химия твердого топлива / Под ред. Д. А. Розенталя. — Издательство "Химия 1976. — С. 256.
3. Сидельковский Л. Н, Юренев В. Н. Котельные установки промышленных предприятий. — 3-е издание изд. — Издательство «Энергия», 1988. — С. 528.
4. Сполдинг Д. Б. Горение и массообмен. — Москва : Перевод на русский язык «Машиностроение», 1985. — С. 240.
5. Лавров Н. В., Шурыгин А. П. Введение в теорию горения и газификации топлива / Под ред. В. М. Попов. — Москва : Издательство академии наук СССР, 1962. — С. 212.
6. Comparison of Measurements and Predictions of Flame Structure and Thermal NOx, in a Swirling, Natural Gas Diffusion Flame / R. D. Boardman, C. N. Eatough, G. J. GERmane, L. D. Smoot // Combustion Science and Technology. — 1993. — sep. — Vol. 93, no. 9. — P. 193–210.
7. Components, formulations, solutions, evaluation, and application of comprehensive combustion models / A. M. Eaton, L. D. Smoot, S. C. Hill, C. N. Eatough // Progress in Energy and Combustion Science. — 1999. — aug. — Vol. 25, no. 4. — P. 387–436.