

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет математики, фізики та інформаційних технологій

(повне найменування інституту/факультету)

Кафедра загальної фізики і фізики теплоенергетичних та хімічних процесів

(повна назва кафедри)

Д и п л о м н а р о б о т а

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: «Запалювання і горіння вугільних частинок в холодних
азотно-кисневих сумішах»

«Ignition and combustion of coal particles in the cold nitrogen-oxygen mixture»

Виконала: студентка денної форми навчання
напряму підготовки 6.040203 Фізика
Батуріна Альона Павлівна

Керівник к.ф.-м.н., доцент Черненко О.С. _____

Рецензент д.ф.-м.н., с.н.с. Вишняков В.І.

Рекомендовано до захисту:

Протокол засідання кафедри

№ 18 від 14.06.2019 р.

Захищено на засіданні ЕК № __

протокол № __ від __.__.2019 р.

Оцінка ____/____/____
(за національною шкалою, шкалою ECTS, бали)

Завідувач кафедри

Голова ЕК

(підпис)

Гоцульський В.Я.

(підпис)

Шевчук В.Г.

Одеса – 2019

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВУГІЛЬНИХ ЧАСТИНОК.....	6
1.1. Зміна твердого палива в процесі його спалювання	6
1.2. Вимірювання уявної густини	8
1.3. Вимірювання питомої площі поверхні	9
1.4. Степеневий закон зв'язку діаметру і густини частинки	13
1.5. Дифузія усередині пор. Розміри пор.	17
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СТЕПЕНЕВОГО ЗАКОНУ	20
2.1. Фізико-математичне формулювання моделі	20
2.2. Вплив золи	22
2.3. Постановка завдання.....	23
2.4. Аналіз константи внутрішнього реагування.	25
2.5. Розв'язок при кнудсенівській дифузії.....	25
2.6. Розв'язок при молекулярній дифузії.....	27
2.7. Обробка експериментальних результатів по горінню частинок	28
різного вугілля	28
2.8. Обговорення результатів.	33
ВИСНОВКИ.....	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:	38

ВСТУП

Спалювання пилоподібного твердого палива є домінуючою системою для вироблення електроенергії. Основною причиною є наявність і відносно низька ціна на вугілля як початкова сировина, яке знижується з 2009 року і, як очікується, буде низькою до 2020 року [1].

При використанні вугільного пилу як пального важливим питанням залишається прогноз ступеня його вигорання. Більшість робіт фокусуються на кінетиці і не визначають кількісно такі властивості, як діаметр частинок, густина, пористість, питому поверхню пор і їх зміну в процесі вигорання. Існує ряд експериментальних даних (рис. 1) по зміні діаметру і густини частинок коксу різних марок вугілля [1-9]. Не дивлячись на те, що є великий розкид і аналіз горіння кожного вугілля необхідно розглядати індивідуально, залежність зміни густини від діаметру частинки можна апроксимувати залежністю

$$\rho / \rho_0 = (d / d_0)^\alpha.$$

У різних дослідженнях використовувалися різні підходи і методи вимірювань. В цілому вид палива, розмір, умови згорання, зокрема температура горіння, роблять сильний вплив на режим згорання. До того ж в процесі вигорання частин-

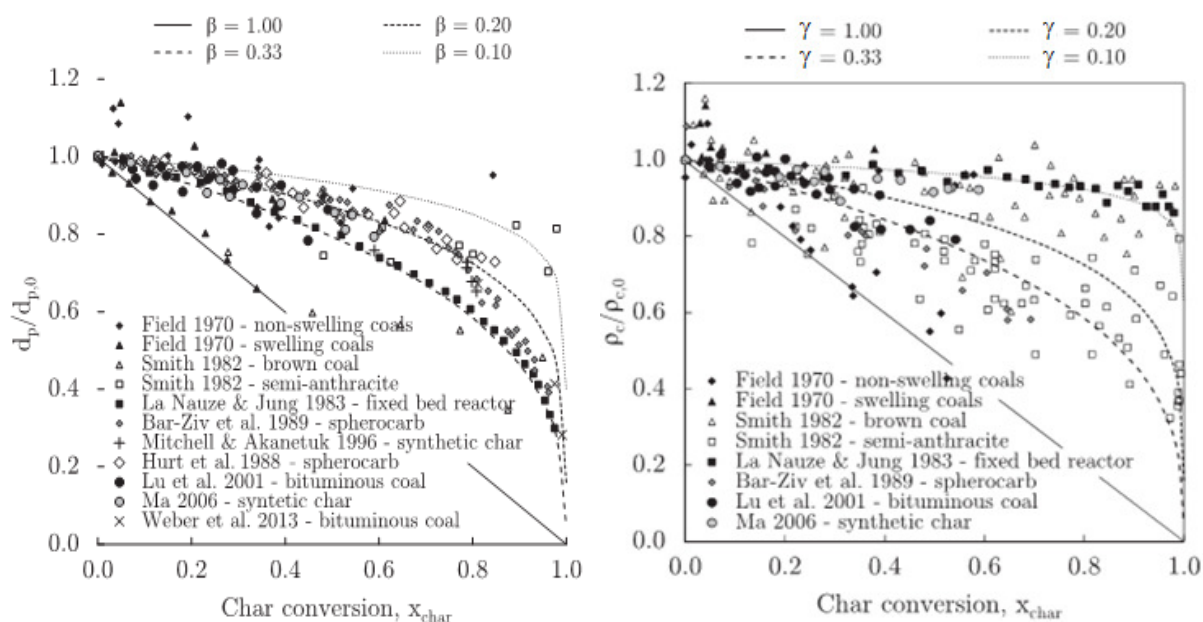


Рис. 1. Залежності відносного а) діаметра б) густини частинок різного вугілля при їх горінні в азотно-кисневих сумішах [2-9]

ки змінюється і пористість і питома поверхня пор.

Більшість даних представлені при високих температурах (1200 – 2200 K) і дрібних частинок (від 10 до 100 мкм), що типово для спалювання пиловугільного факела [10-15]. В основному частинки горять із зменшенням густини і діаметру з різними показниками α , залежно від умов.

Як параметр, що дозволяє встановити режим горіння частинки [7, 16, 17], використовується коефіцієнт ефективності η . Він визначається відношенням ефективної швидкості реакції з урахуванням масопереносу окислювача до швидкості хімічної реакції. Його значення міняється в межах $0 < \eta < 1$ і залежить від морфології матеріалу частинки, діаметру і питомої поверхні пор. Як правило, підвищення пористості частинки, питомої поверхні і діаметру пор приводить до збільшення швидкості її горіння.

Стадія горіння частинки коксу вважається найбільш повільною. На її тривалість впливають дифузія окислювача до зовнішньої поверхні і поверхні пор вуглецевого масиву, а також температури газової суміші і частинки. Для крупних вугільних частинок характерний, що летючі гази покидають частинку до початку стадії горіння. Таким чином, горить лише коксовий залишок. Кокс вугілля з високим вмістом летючих достатньо пористі. Тому зміна пористості частинки в процесі горіння може бути істотне, не дивлячись на те, що багато хто приймає слабку роль внутрішнього реагування в процесі горіння.

При низьких температурах поверхневі реакції визначають сумарну швидкість реакцій, і реагування проникає у всі пори ($\eta = 1$). Розмір частинки практично не змінюється, а густина поступово зменшується.

При дуже високих температурах дифузія окислювача лімітує швидкість реакцій. Реагування відбувається тільки переважно на зовнішній поверхні частинки ($\eta = 0$) і концентрація окислювача усередині частинки близька до нуля. Тому густина частинки в процесі горіння залишається незмінною, а діаметр зменшується.

Найбільш цікавим випадком є проміжна ділянка температур горіння, де одночасно в процесі горіння зменшуються густина і діаметр частинки.

Для встановлення таких режимів окислення зазвичай знижують концентра-

цію кисню в суміші (наприклад, до 5-10 про. %) [3]. Тоді температури горіння частинок помітно знижуються. Аналогічного ефекту можна добитися, підвищуючи частку кисню в суміші, але при цьому беруть низькі температури суміші (холодні суміші). В цьому випадку реалізація режиму горіння здійснюється в результаті запалення [18].

Метою даної роботи є аналіз залежностей густини від діаметру пористої вуглецевої частинки для встановлення закономірностей при її горінні в зовнішньому дифузійному режимі. Проаналізувати як залежить показник ступеня α від природи, структури частинок вугілля (пористості).

Об'єктом дослідження залежність густини від діаметру пористої частинки коксу, що горить в азотно-кисневих сумішах.

Предметом дослідження є механізми тепломасобміну і кінетики горіння пористих частинок коксу різного вугілля.

ВИСНОВКИ

Показано, що існує область горіння (високе значення внутрішнього дифузійно-кінетичного відношення, $Se_v > 5$), коли вдається аналітично визначити зв'язок між густиною і діаметром. Так при описі дифузії кисню усередині пор через кнудсенівську дифузію вдається отримати вираз, що описує аналітично залежність густини частинки і діаметру при її горінні, куди входить комплекс відносного діаметру в ступені α_0 . Аналогічний результат вдається отримати і в припущенні молекулярної дифузії кисню усередині пор частинок коксу.

Аналітично отримана залежність якісно відрізняється від степеневі залежності $\rho / \rho_0 = (d / d_0)^\alpha$ якою зручно обробляти емпіричні дані.

Проте, обидві залежності можливо порівняти, внаслідок чого отриманий зв'язок між показниками ступеня α і α_0 . Для якнайповнішої відповідності запропоновано умови їх взаємного перетину в точка перегину аналітичної кривої при $d/d_0 = 0.5$

Використовуючи отриманий зв'язок показника ступеня α_0 з параметрами пористої частинки, оцінені значення питомої поверхні пор коксу деякого вугілля.

Батуріна А. П.

(підпис автора роботи)

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. *Ulrich Klein hans, Stefan Halama, Hartmut Spliethoff* // Fuel Processing Technology. – 2017. – Vol. 171. – P. 361-373.
2. *Smith I.W.* The combustion rates of coal chars // Symp. Combust. 1982. – Vol. 19(1) – P. 1045–1065
3. *Field M.A.* Measurements of the effect of rank on combustion rates of pulverized coal // Combust. Flame. – 1970. – Vol. 14 (2). – P. 237–248.
4. *Smith I. W.* The combustion rates of coal chars: a review // Nineteenth Symposium (International) on Combustion / The Combustion Institute. – 1982. – P. 1045-1065.
5. *Jung K., La Nauze R. D.* Particle size and density changes during fluidized-bed combustion // Can. J. Chem. Eng. – 1983. – Vol. 61 (2) . – P. 262–264.
6. *Bar-Ziv E., Jones D.B., Spjut R.E., Dudek D.R., Sarofim A.F., Longwell J.P.* Measurement of combustion kinetics of a single char particle in an electrodynamic thermogravimetric analyzer // Combust. Flame. – 1989. – Vol. 75 (1) . – P. 81–106.
7. *Liqiang Ma* Combustion and gasification of chars in oxygen and carbon dioxide at elevated pressure // dissertation for the degree of doctor of philosophy. – 2006. // [researchgate.net/publication/35884451](https://searchgate.net/publication/35884451).
8. *Lu L., Sahajwalla V., Harris D.* Coal char reactivity and structural evolution during combustion – factors influencing blast furnace pulverized coal injection operation // Metall. and Mater. Trans. B. – 2001. – Vol. 32 (5) . – P. 811–820.
9. *Bartholomew J. Waters, Robert G. Squires and Normand M. Laurendeau* Evidence for formation of CO₂ in the vicinity of burning pulverized carbon particles // Combustion and Flame. – V. 74. – 1988. – P: 91-106.
10. *Hurt R.H.* Statistical kinetics for pulverized coal combustion // Symp. Combust. – 1996. – Vol. 26 (2) . – P. 3169–3177.
11. *Halama S., Spliethoff H.* Numerical simulation of entrained flow gasification: reaction kinetics and char structure evolution // Fuel Process. Technol. – 2015. – Vol. 138. – P. 314–324.
12. *Haugen N. E. L., Tilghman M. B., Mitchell R. E.* The conversion mode of a porous carbon particle during oxidation and gasification // Combust. Flame. – 2014. – Vol.

161 (2). – P. 612 – 619

13. *Smoot L. D., Hedman P.O., Smith P. J.* Pulverized-coal combustion research at Brigham Young University // *Prog. Energy Combust. Sci.* – 1984. – Vol. 10 (4) . – P. 359–441.
14. *Wu H., Wall T. F., Liu G., Bryant G.* Ash liberation from included minerals during combustion of pulverized coal: the relationship with char structure and burnout //. – *Energy Fuel.* – 1999. – Vol. 13 (6) . – P. 1197–1202.
15. *Reginald E. Mitchell, Liqiang Ma, Bum Jick Kim* On the burning behavior of pulverized coal chars // *Combustion and Flame.* – 2007. – № 151. – P. 426–436.
16. *Essenhigh R. H.* Influence of initial particle density on the reaction mode of porous carbon particles // *Combustion and flame.* – 1994. – Vol. 99. – P. 269-279.
17. *Essenhigh R.H.* An integration path for the carbon-oxygen reaction with internal reaction // *Symp. Combust.* – 1989. – Vol. 22 (1) . – P. 89–96.
18. *Черненко А.С.* Зажигание и горение частиц древесного угля в холодных азотно-кислородных смесях комнатной температуры. Часть I. Экспериментальные исследования. // *Физика аэродисперсных систем.* – 2014. – № 51. – С. 67-72.
19. *Головина Е. С.* Высокотемпературное горение и газификация углерода. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 176 с.
20. *Kalinchak V. V., Chernenko A. S. and Korchagina M. N.* Modified constant of combustion of porous coal particles // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics.* – 2019. – Vol. 92, №. 1, January // DOI 10.1007/s10891-019-01926-6
21. *Дубинин М. М.* Адсорбция и пористость. – М., ВАНХЗ: 1972. – 128 с.