

ПРО ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ПИЛОПОДІБНОГО ПАЛИВА

Ступак Ю.О., к.т.н., доц.

Національна металургійна академія України

Вступ. Основу сучасної теорії горіння твердого палива, зокрема пилоподібного вугілля, складають результати численних наукових досліджень, здійснених ще в середині минулого століття (1946-1966 рр.) вітчизняними та зарубіжними фахівцями. Основу теорії склали результати робіт Г.Ф. Кнорре, О.С. Предводителева, Л.М. Хітріна, Я.Б. Зельдовича, Д.А. Франк-Каменецького, Б.Д. Канцельсона, В.М. Третьякова, В.В. Померанцева, Б.В. Канторовича та багатьох інших вчених. Не зважаючи на сучасні тенденції щодо скорочення використання вуглецевого палива та переходу до відновлювальних (т.з. «зелених») джерел енергії, в усьому світі продовжуються дослідження, пов'язані з вдосконаленням існуючих теплоенергетичних установок та використанням альтернативних видів твердого палива, на кшталт відходів сільськогосподарського та інших виробництв. Спільним майже для всіх досліджень було і залишається забезпечення максимально ефективного (повного) згорання палива, в останні десятиліття – з мінімальним впливом на довкілля.

Приблизно з середини 60-х років минулого століття з метою економії коксу у виробництві чавуну почали використовувати т.зв. пиловугільне паливо (ПВП) з вугілля, що непридатне до коксування. ПВП виявилось настільки ефективним замінником коксу, що його витрату на доменних печах поступово довели до 100-150 кг на 1 т чавуну. Але подальше збільшення його витрати стримували декілька чинників. Одним з найсуттєвіших виявилось забезпечення повноти згорання часток вугілля у фурмених осередках доменної печі. Для вирішення проблеми що виникла металургами були залучені методи досліджень, які розроблені й використовуються енергетиками, оскільки і об'єкт досліджень – горіння поодиноких часток палива (або факелу), і кінцева їхня мета – забезпечення повного згорання, по суті співпадали. Дослідження, що були проведені і проводяться дотепер дозволяють отримати багато корисної

інформації щодо поведінки того чи іншого виду палива під час горіння, яку в подальшому використовують на практиці.

Основний матеріал. Основну увагу було приділено методам лабораторних досліджень горіння (газифікації) пилоподібного палива, виготовленого з вугілля або інших видів твердого палива, що містять вуглець (торф, деревина, біомаса тощо). Дослідженням були охоплені всі публікації (за останні 30 років), які є на поточний час у вільному доступі і які містять опис обладнання для моделювання процесу горіння пилоподібного палива та результати експериментів, проведених на цьому обладнанні. Метою дослідження був аналіз сучасних підходів до моделювання горіння ПВП, перш за все таких, які можуть надати інформацію для пошуку шляхів підвищення ефективності вдування вугілля (або паливних сумішей) у доменні печі. В тому числі – з точки зору забезпечення повного згорання (газифікації) часток палива в межах фурмених осередків.

В енергетиці «якість» спалювання твердого пилоподібного палива в котлах та інших агрегатах може бути охарактеризована за допомогою двох величин – т.зв. «хімічного недопалу» (q_3) та «механічного недопалу» (q_4), що використовуються при складанні теплових балансів горіння. Їхній фізичний сенс згідно підручників та нормативних документів (наприклад [1]) такий. Хімічний недопал q_3 – це втрати тепла, яке можна було б отримати з горючих газів (CO , H_2 , CH_4), що залишають процес, потрапляючи до продуктів згорання (димових газів). Обчислюється у % до потенційної теплоти палива (для твердого – нижча теплота згорання робочої маси з урахуванням фізичного тепла власне палива). Відповідно q_4 – кількість тепла, що втрачається з горючими речовинами (недопал вуглецю та ін.), які потрапляють до шлаку, провалу та винесення. Для типових камерних топків з твердим та рідким шлаковидаленням значення q_3 і q_4 є табличними величинами, які можна знайти у відповідних довідниках. Теоретично, маючи необхідні вихідні дані, їх можна розраховувати для кожного конкретного випадку, але через велику кількість складових, що підлягають вимірюванню, такий підхід є досить громіздким і ненадійним, оскільки точно визначити об'єми димових газів, вагу недопалу,

провалу тощо є доволі складним завданням навіть в лабораторних умовах, не кажучи вже про промислові агрегати.

Враховуючи зазначене, в сучасних лабораторних дослідженнях горіння різних видів пилоподібного палива використовують інші методи, що підтвердили свою ефективність. Так, в доволі поширених дослідженнях горіння поодиноких часток достатньо ефективною виявилася високошвидкісна фото- та відеофіксація [2, 3 та ін.] всіх стадій горіння з подальшим визначенням відносної тривалості окремих стадій та інтерпретацією результатів з використанням математичних моделей та сучасних методів лабораторних досліджень. Серед таких методів у сучасних дослідженнях горіння палива використовуються наступні: термогравіметрія в поєднанні з мас-спектрометрією (*TG-MS*), інфрачервона Фур'є-спектроскопія (*FT-IR*) та рамановська спектроскопія (*Raman spectroscopy*), скануюча електронна (*SEM*) і просвічуюча електронна мікроскопія високої роздільної здатності (*HRTEM*), рентгеноскопія (*X-ray Diffraction* або *XRD*) та деякі інші. В залежності від типу палива, умов експерименту і поставлених цілей перелічені методи часто комбінують для отримання більш достовірних результатів.

В сучасних українських реаліях, нажаль, не завжди є можливість використовувати названі методи і відповідне (не дешево!) обладнання. Але це далеко не завжди є необхідним. Аналіз існуючих методик лабораторних досліджень горіння як поодиноких часток ПВП, так і пиловугільного факелу, починаючи з робіт В.М. Третьякова, Б.Д. Канцельсона, В.І. Бабія та ін. (1947-1987 рр.) і закінчуючи чисельними сучасними (2010-2020 рр.), а також власний досвід автора, дозволяють стверджувати наступне. Для вирішення багатьох практичних завдань, таких як порівняльна оцінка різних видів ПВП, розробка методів оптимізації та інтенсифікації спалювання будь якого твердого пилоподібного палива тощо цілком достатньо більш-менш відпрацьованої та надійної (щодо відтворюваності результатів) методики, яка б включала газову хроматографію, термогравіметрію і технічний аналіз зразків палива до та після його згорання. Достатньо поширеною методикою, що може відповідати вказаним критеріям є спосіб дослідження горіння потоку пилоподібного палива на установках типу «вертикальна трубчаста піч» (англ. - *drop tube furnace*). Подібні установки зазвичай включають електричну нагрівальну піч з реакційною камерою у вигляді вертикально встановленої труби з вогнетривкого матеріалу (рисунок).

У верхній частині встановлюють живильник, який має забезпечувати рівномірну подачу палива до реакційного простору. Окрім введення палива конструкція вузла вводу зазвичай забезпечує одночасну подачу окислювача і охолодження елементів конструкції для запобігання передчасного нагріву палива та інших негативних наслідків. Нижня частина установки повинна забезпечувати відвід продуктів згорання, мати достатньо ефективну систему припинення горіння часток палива та їх накопичення для подальшого дослідження.

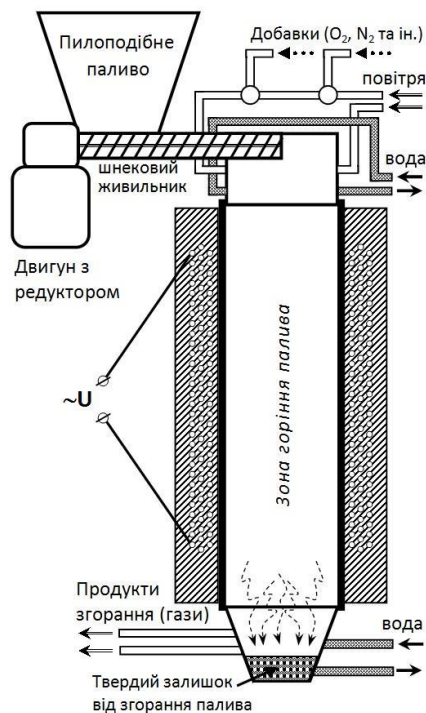


Рисунок – Схема будови установки типу «вертикальна трубчаста піч» для досліджень горіння пилоподібного палива

Результати проведених за участі автора досліджень на подібній установці [4, 5], а також аналіз результатів експериментів на аналогічному обладнанні інших дослідників [6-8 та ін.] свідчать, що для отримання надійних результатів щодо згорання палива важливими моментами є наступні:

- реакційний простір печі, в якому відбувається горіння, повинний мати чітко виражену і незмінну з плином часу ізотермічну зону потрібної (за умовами моделювання процесу горіння) довжини;

- важливими є технічні характеристики живильника, для якого обов'язковими параметрами є забезпечення точності дозування, стабільності та незмінності на протязі всього експерименту (серії експериментів) витрати палива та його співвідношення з окислювачем (повітря, кисень тощо);

- не можна допускати продовження процесу горіння (тління) залишків палива, що досягли нижньої частини печі, а також потрапляння дрібнодисперсних частинок золи до продуктів згорання;

- слід забезпечити достовірний технічний аналіз вихідного палива, а також залишку після його горіння (наприклад згідно [9, 10]).

Виконання цих та деяких інших умов (надійна робота приладів для контролю температури, витрати повітря, домішок тощо) – достатньо складне технічне завдання, але є запорукою отримання більш-менш прийнятних даних, за якими можна оцінювати повноту згорання (газифікації) палива, порівнювати одне паливо з іншим за різними критеріями, розраховувати показники для оцінки кінетичних параметрів процесу і ступінь їхньої залежності від різних факторів.

З огляду на можливість використання розглянутих установок (рисунок) для моделювання процесів горіння ПВП в потоці дуття доменної печі дуже важливим є спосіб визначення повноти згорання палива. Зіставлення підходів, що застосовувалися у дослідженнях на подібних установках в останні роки [6-8, 11-13] показало, що запропонована свого часу автором [5] і випробувана на практиці методика визначення повноти згорання (формула 1) може використовуватися для розрахунків цього важливого показника:

$$\varphi = \left[1 - \frac{A_{\text{ПВП}}(100 - A_{\text{ост}})}{A_{\text{ост}}(100 - A_{\text{ПВП}})} \right] \times 100, \%, \quad (1)$$

де φ - повнота згорання ПВП, %; $A_{\text{ПВП}}$ – вміст золи у вихідному ПВП; $A_{\text{ост}}$ – вміст золи в остатку після горіння.

Суттєвою відмінністю визначення повноти згорання ПВП за формулою (1) є відносна простота методу, завдяки мінімальній кількості даних для розрахунку та відсутності потреби в аналізах на вміст залишкового вуглецю в остатку після горіння або потреби у визначенні кількості вуглецю, що в процесі термічної деструкції та горіння був газифікований.

Висновки. Аналіз методик лабораторних досліджень горіння пилоподібного палива показав, що для вирішення багатьох практичних завдань сьогодення, зокрема – пошук шляхів підвищення повноти згорання ПВП у фурмених осередках доменних печей, можуть застосовуватися установки типу «вертикальна трубчаста піч» за умов дотримання окремих вимог щодо лабораторного обладнання та організації експериментів. Такі установки дозволяють відтворювати умови горіння, максимально наближені за

параметрами до умов горіння ПВП в потоці дуття доменних печей і досліджувати вплив на повноту згорання ПВП різних факторів.

Література

1. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). Изд. 3-е, перераб. –СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
2. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
3. Marek E, Staczyk K. Case studies investigating single coal particle ignition and combustion // Journal of Sustainable Mining. Volume 12, Issue 3, 2013, Pages 17-31.
4. Бондаренко П.К., Котов В.И., Ступак Ю.А. Моделирование процесса горения пылеугольного топлива в фурме доменной печи // Изв. вузов. Черная металлургия. 1990. №7. С. 103.
5. Ступак Ю.А. Изучение процесса горения пылеугольного топлива в лабораторных условиях // Изв. вузов. Черная металлургия. 1993. №8. С. 35-36.
6. Shan-Wen Du, Wei-Hsin Chen, John A. Lucas. Pulverized coal burnout in blast furnace simulated by a drop tube furnace // Energy. 35 (2010). P. 576–581. DOI: 10.1016/j.energy.2009.10.028.
7. Steer Ju., Marsh R., Morgan D., Greenslade M. The effects of particle grinding on the burnout and surface chemistry of coals in a drop tube furnace // Fuel. 160 (2015). 413–423.
8. Sarroza A., Bennet T., Eastwick C., Liu H. Characterising pulverised fuel ignition in a visual drop tube furnace by use of a high-speed imaging technique // Fuel Processing Technology 157 (2017) 1–11.
9. ДСТУ ISO 17246:2010 Вугілля. Технічний аналіз. – Київ.: ДП «Держспоживстандарт України», 2014. – 4 с.
10. ГОСТ 11022-95 (ISO 1171-97) Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности. – Минск: ИПК «Изд-во стандартов», 1996. -8 с.
11. Sabuj Halder. An Experimental Perspective on Praxair's Hot Oxygen Technology to Enhance Pulverized Solid Fuel Combustion for Ironmaking Blast Furnaces // Praxair Inc. 2011.
<http://www.praxair.com/praxair.nsf/AllContent/31B770CF22B3FBBF8525799F0075226F>
12. Ueki Ya., Yoshiie R., Naruse I. Combustion Behavior of Pulverized Coal and Ash Particle Properties during Combustion // ISIJ International, Vol. 55 (2015), No. 6, pp. 1305–1312.
13. Lewtak R., Hercog Ja. Coal char kinetics of oxidation and gasification reactions // Chemical and Process Engineering 2017, 38 (1), 135-145. DOI: 10.1515/cpe-2017-0011.

ABOUT SOME FEATURES OF LABORATORY RESEARCHES FOR PROCESS OF PULVERIZED FUEL BURNING

Stupak Yurii

Abstract. The analysis of scientific publications containing information about the equipment and methods of modeling the process of pulverized fuel combustion is carried out. The basic requirements for ensuring the reliability of research results are formulated. The conclusion is made about the possibility and expediency of using installations of the type "vertical tubular furnace" to find ways to increase the completeness of pulverized coal combustion in the blast furnaces raceway. Emphasis is placed on the importance of ensuring a uniform supply of fuel to the reaction zone, a time-stable ratio of fuel and oxidant, qualitative technical analysis of the source fuel, as well as the residue after its combustion. Based on a comparative analysis of methods for determining the completeness of burnout of pulverized fuel used in such studies, a convenient formula for its calculations is proposed.

Keywords: pulverized coal (pc), burnout, drop tube furnace, blast furnace, raceway.

References

1. Thermal calculation of boilers (standard method). Ed. 3rd, rev. –SPb .: NPO CKTI, 1998. - 256 p.
2. Babi V.I., Kuvaev Yu.F. Combustion of coal dust and calculation of a pulverized coal torch. –M .: Energoatomizdat, 1986. - 208 p.
3. Marek E, Staczyk K. Case studies investigating single coal particle ignition and combustion // Journal of Sustainable Mining. Volume 12, Issue 3, 2013, Pages 17-31.
4. Bondarenko P.K., Kotov V.I., Stupak Yu.A. Modeling of the combustion process of pulverized coal fuel in the tuyere of a blast furnace // Izv. universities. Ferrous metallurgy. 1990. No. 7. P. 103.
5. Stupak Yu.A. Study of the combustion of pulverized coal fuel in laboratory conditions // Izv. universities. Ferrous metallurgy. 1993. No. 8. S. 35-36.
6. Shan-Wen Du, Wei-Hsin Chen, John A. Lucas. Pulverized coal burnout in blast furnace simulated by a drop tube furnace // Energy. 35 (2010). P. 576–581. DOI: 10.1016/j.energy.2009.10.028.
7. Steer Ju., Marsh R., Morgan D., Greenslade M. The effects of particle grinding on the burnout and surface chemistry of coals in a drop tube furnace // Fuel. 160 (2015). 413–423.

8. Sarroza A., Bennet T., Eastwick C., Liu H. Characterising pulverised fuel ignition in a visual drop tube furnace by use of a high-speed imaging technique // Fuel Processing Technology 157 (2017) 1–11.
9. DSTU ISO 17246: 2010 Coal. Technical analysis. - Kiev: DP "Derzhspozhivstandart of Ukraine", 2014. - 4 p.
10. GOST 11022-95 (ISO 1171-97) Solid mineral fuel. Ash content determination methods. - Minsk: IPK "Publishing house of standards", 1996. -8 p.
11. Sabuj Halder. An Experimental Perspective on Praxair's Hot Oxygen Technology to Enhance Pulverized Solid Fuel Combustion for Ironmaking Blast Furnaces // Praxair Inc. 2011.
<http://www.praxair.com/praxair.nsf/AllContent/31B770CF22B3FBBF8525799F0075226F>
12. Ueki Ya., Yoshiie R., Naruse I. Combustion Behavior of Pulverized Coal and Ash Particle Properties during Combustion // ISIJ International, Vol. 55 (2015), No. 6, pp. 1305–1312.
13. Lewtak R., Hercog Ja. Coal char kinetics of oxidation and gasification reactions // Chemical and Process Engineering 2017, 38 (1), 135-145. DOI: 10.1515/cpe-2017-0011.