

УДК 622.785

Ягольник М.В., Бойко М.М., Фурсов М.О., Єфіменко В.В., Полякова Н.В.,  
Журавльова С.В.

## Дослідження впливу біоматеріалів на процес спікання залізорудних матеріалів та якість агломерату

*Yaholnyk M.V., Boyko M.M., Fursov M.O., Efimenko V.V., Polyakova N.V., Zhuravlova S.V.*  
**Study of the influence of biomaterials on the process iron ore sintering and product quality**

**Мета.** Основне надходження енергії на агломераційних процес відбувається за рахунок спалювання коксового дріб'язку, який забезпечує близько 78 % енергії, яка споживається в процесі агломерації. Спалювання коксового дріб'язку в агломераційному процесі також є основним джерелом забруднюючих речовин, таких як  $\text{NO}_x$  і  $\text{SO}_x$ . Енергія біомаси вважається перспективною заміною коксового дріб'язку в агломерації по-перше через її відновлюваність, а по-друге – через нижчий вміст S і N. Для зменшення впливу типу біомаси на властивості агломераційного палива, спрощення технології використання біомаси при агломерації можливо виробництво коксового дріб'язку з додаванням в шихту частки біоматеріалів. Метою роботи було визначення впливу на показники агломераційного процесу та якість агломерату заміни частки твердого палива біоматеріалами, які попередньо проходили підготовку. **Методика.** Для дослідження в якості твердого палива використовували промисловий коксовий дріб'язок та коксовий дріб'язок, отриманий при температурі піролізу 850-1100 °C з додаванням 5 - 45 % біоматеріалів. Експерименти проводили на агломераційній установці, яка використовує валася спікання шихти з контролем параметрів процесу. Попередньо шихту огрундовували у змішувачі-грануляторі барабанного типу. Після випробувань оцінювали питому продуктивність агломераційної установки, швидкість спікання, а також властивості агломерату. **Результати.** Представлені результати дослідження показали, що при використанні коксового дріб'язку, отриманого при температурі 1100 °C з додаванням 5 % біоматеріалів, показники агломераційного процесу та якості продукту відповідають таким, що є при використанні промислового коксу. При використанні коксового дріб'язку, отриманого при температурі 850 °C з додаванням 15 % біоматеріалів спостерігається незначні зміни в параметрах процесу відносно базової технології. Застосування коксового дріб'язку, отриманого з використанням понад 15 % біоматеріалів, викликає зниження продуктивності агломераційної установки та міцності отриманого агломерату. Максимальне падіння спостерігається при використанні коксового дріб'язку з температурою піролізу 850 °C та вмістом біоматеріалів 45%. **Наукова новизна.** Встановлено механізм впливу коксового дріб'язку з додаванням біоматеріалів на формування високотемпературних зон в процесі агломерації та кінцевої структури агломерату. **Практична значущість.** Рекомендується застосування в якості агломераційного палива коксового дріб'язку, отриманого при температурі піролізу 850 °C і вмісті біоматеріалів 15 %. При цьому показники агломераційного процесу та якість агломерату зберігаються на базовому рівні. Застосування коксового дріб'язку, отриманого при температурі піролізу 850 °C дозволить знизити енерговитрати на виробництво палива та зменшить загальний екологічний вплив агломераційного виробництва на довкілля.

**Ключові слова:** залізорудний агломерат, коксовий дріб'язок, біоматеріали, екологічний вплив.

**Purpose.** The main input of energy to the sintering process is due to the burning of coke fines. Combustion of coke fines in the sintering process is also a major source of pollutants such as  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_x$ . Biomass energy is considered a promising replacement for coke fines in sintering due to its renewable nature and lower S and N content. It is possible to produce coke fines with the addition of biomaterials to the charge to reduce the influence of the type of biomass on the properties of fuel and simplifying the technology of using biomass during sintering. The purpose of the work was to determine the impact on the indicators of the agglomeration process and the quality of the agglomerate of replacing the solid fuel with biomaterials. **Methodology.** Industrial coke fines and coke fines obtained at a pyrolysis temperature of 850-1100 °C with the addition of 5 - 45% biomaterials were used for research as solid fuel. The experiments were carried out on a sintering unit with control of the process parameters. Previously, the charge was lumped in a drum-type mixer-granulator. After the tests, the specific productivity of the sintering unit, the sintering rate, and the properties of the agglomerate were evaluated. **Findings.** The results of the study were established that when using coke fines obtained at a temperature of 1100 °C with the addition of 5% biomaterials, the indicators of the agglomeration process and product quality correspond to those of industrial coke. When using coke fines obtained at a temperature of 850 °C with the addition of 15% of biomaterials, there are slight changes in the process parameters relative to the basic technology. The use of coke fines obtained with the use of more than 15% of biomaterials causes a decrease in the productivity of the sintering unit and the strength of the resulting agglomerate. **Originality.** The mechanism of influence of coke fines with the addition of biomaterials on the formation of high-temperature zones during the agglomeration process and the final structure of the agglomerate was established. **Practical value.** It is recommended to use coke fines obtained at a pyrolysis temperature of 850 °C and a biomaterial content of 15% as sintering fuel. The use of coke fines obtained at a pyrolysis temperature of 850 °C will reduce energy costs for fuel production and reduce the overall environmental impact of agglomeration production on the environment.

**Keywords:** iron ore agglomerate, coke fines, biomaterials, environmental impact.

### Вступ

Агломерація залізної руди – складний металургійний процес, який потребує значних витрат тепла, за рахунок спалювання дрібнофракційного твердого палива. Залишаючись найпоширенішим в світі способом підготовки залізорудних матеріа-

лів до доменної плавки, агломерація залізних руд є одним з найбільших забруднювачів повітря з усіх металургійних процесів. Для зменшення впливу на довкілля агломераційного процесу можливо використовувати в якості палива біоматеріали. Однак при використанні таких матеріалів виникають тру-

днощі з досягненням необхідних показників процесу та якості готового агломерату.

### Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Агломерація є першим процесом металургійної промисловості, який відіграє важливу роль у процесі виробництва чавуну та сталі, і його енергоспоживання становить значну частку від загальних витрат на виробництво чавуну [1]. Основне надходження енергії на агломераційних процес відбувається за рахунок спалювання коксового дріб'язку, який забезпечує близько 78 % енергії, яка споживається в процесі агломерації [2]. Залежність підприємств чавуну від викопної енергії призводить до викидів у середньому 1,65 - 1,8 тони вуглекислого газу на тонну виробленої рідкої сталі, а викид вуглекислого газу в процесі агломерації становить понад 10 % від загального обсягу викидів сталеплавильної промисловості [3, 4]. Спалювання коксового дріб'язку в агломераційному процесі також є основним джерелом забруднюючих речовин, таких як  $\text{NO}_x$  і  $\text{SO}_x$ . Викиди  $\text{NO}_x$  у процесі агломерації становлять 48 % викидів усієї металургійної промисловості, а  $\text{SO}_x$  до 70 % [3].

Основне паливо, що використовується в традиційному процесі агломерації, коксовий дріб'язок – дрібна фракція коксу, яка утворюється в процесі його виробництва, має крупність часток менше 3 мм та є невідновлюваним викопним ресурсом з високим вмістом S і N. Це призводить до проблеми, пов'язаної з високим споживанням енергії в металургійній промисловості та забрудненням повітря. Енергія біомаси вважається перспективною заміною коксового дріб'язку в агломерації поперше через її відновлюваність, а по-друге через нижчий вміст S і N [5, 6]. Біомаса все частіше використовується як джерело енергії для теплових процесів, і наразі вона є третім за величиною природним та відновлювальним джерелом енергії у світі [7]. При використанні біомаси відсутня необхідність змінювати вже наявне обладнання та існуючі процеси для отримати альтернативного коксового дріб'язку для використання процесі агломерації. За допомогою процесу піролізу біомаса перетворюється на вуглецевий продукт зі структурою, властивостями та складом, подібними до коксового дріб'язку.

В Україні та за кордоном проводились експериментальні дослідження впливу на процес агломерації а якості агломерату деревного вугілля, яке використовували для часткової заміни коксового дріб'язку. Результати показують, що використання деревного вугілля замість частини коксового дріб'язку в агломераційному процесі суттєво не впливає на характеристики спікання та якість спекеного продукту, крім того, зменшується викид забруднюючих газів, що утворюються в процесі агломерації [8 - 12]. Однак виробництво деревинного вугілля з біомаси потребує окремих виробничих ліній, крім того в залежності від типу біомаси змінюється властивості деревинного вугілля та коефіцієнти заміни коксового дріб'язку. Тому, для зменшення впливу типу біомаси на властивості палива, спрощення технології використання біомаси при агломерації можливо виробництво коксового дріб'язку з додаванням в шихту частки біоматеріалів.

### Мета і завдання досліджень

Метою цього дослідження було визначення впливу на показники агломераційного процесу та якість агломерату заміни частки твердого палива біоматеріалами, які попередньо проходили різну підготовку. За результатами дослідження можна зробити висновки щодо ефективності та доцільності того чи іншого виду підготовки біоматеріалів до застосування при агломерації.

### Матеріали та методи дослідження

Для дослідження в якості твердого палива використовували промисловий коксовий дріб'язок та коксовий дріб'язок, отриманий при температурі піролізу 950-1100 °C з додаванням 5 - 45 % біоматеріалів, а саме – гранул с деревинної біомаси. Методика отримання коксового дріб'язку з додаванням біоматеріалів, склад та особливості отриманого коксового дріб'язку наведені в попередній роботі [12]. Окрім твердого палива для виробництва агломерату використовували залізну руду, залізорудний концентрат, вапно, вапняк.

Хімічний склад шихтових матеріалів наведено в таблицях 1.

Таблиця 1

Хімічний склад залізної руди та залізорудного концентрату

| Матеріал                | Вміст, %                  |              |                         |                |                         |              |              |       |             |
|-------------------------|---------------------------|--------------|-------------------------|----------------|-------------------------|--------------|--------------|-------|-------------|
|                         | $\text{Fe}_{\text{заг.}}$ | $\text{FeO}$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$ | $\text{MgO}$ | ВПП   | Інші оксиди |
| Залізорудний концентрат | 65.88                     | 28.27        | 62.71                   | 6.44           | 0.30                    | 0.17         | 0.26         | 1.85  | -           |
| Залізна руда            | 57.75                     | 1.76         | 80.54                   | 12.71          | 1.60                    | 1.72         | 0.62         | 1.82  | 0.47        |
| Вапняк                  | 0.28                      | -            | 0.40                    | 1.50           | 0.56                    | 48.50        | 0.92         | 43.56 | -           |
| Вапно                   | 12.66                     | -            | 18.09                   | 1.80           | 26.61                   | 86.80        | 1.40         | -     | -           |

У таблиці 2 наведено склад агломераційної шихти, що відповідає промисловій. Склад шихти був однаковий для всіх спікань, змінювався лише тип палива. Основність шихти становила 1,4.

Експерименти проводили на агломераційній установці (рис. 1), яка використовувалася спікання

шихти з контролем параметрів процесу. Попередньо шихту огрудували у змішувачі-грануляторі барабанного типу довжиною 0,8 м і діаметром 0,53 м та швидкістю обертання 30 об/хв.

Таблиця 2  
Склад агломераційної шихти

| Компонент               | Вміст, % | Розмір часток, мм |
|-------------------------|----------|-------------------|
| Залізорудний концентрат | 46.75    | <0.1              |
| Залізна руда            | 10.5     | 0-10              |
| Вапно                   | 1.5      | 0-3               |
| Вапняк                  | 10.25    | 0-3               |
| Тверде паливо           | 6        | 0-3               |
| Зворот                  | 25       | 5-10              |

. Витрата води в усіх дослідах становила 8%. Особливості проведення процесу спікання, методики визначення питомої продуктивності агломераційної установки, швидкості спікання, а також властивостей агломерату детально описані в роботах [12, 13, 14].

### Результати дослідження

В таблиці 3 представлено зведені результати дослідження – параметри агломераційного процесу та якості отриманого агломерату.

Результати експериментів можна розділити на дві групи. Перша – це використання в агломераті

коксового дріб'язку з вмістом біоматеріалів 5%, який був отриманий при різних максимальних температурах піролізу. Друга група – використання коксового дріб'язку, отриманого при температурі 850 °C з різним вмістом біоматеріалів від 15 до 45 %.

На рисунку 2 показані зміни виходу придатного агломерату, вертикальної швидкості спікання, питомої продуктивності, швидкості фільтрації газу, міцності агломерату та його відновності при використанні в якості палива промислового коксового дріб'язку та коксового дріб'язку з 5 % біоматеріалів, отриманих за різних температур.

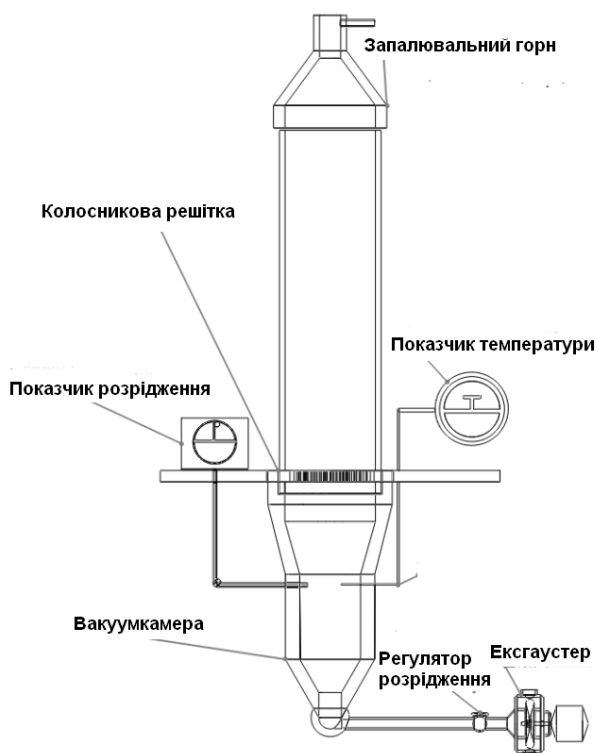


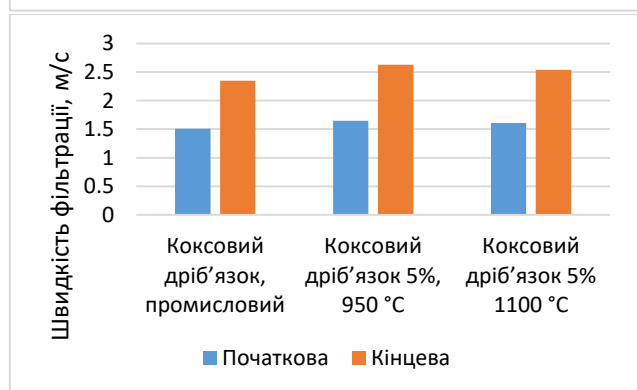
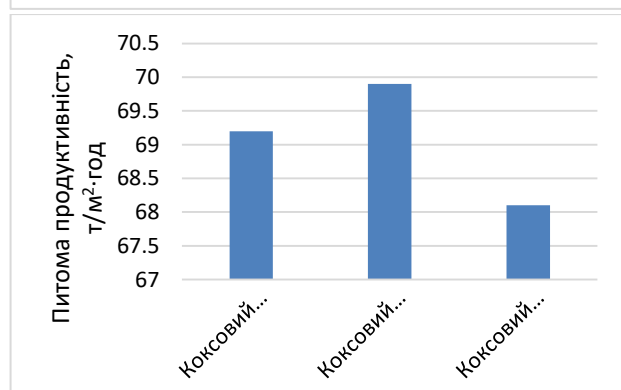
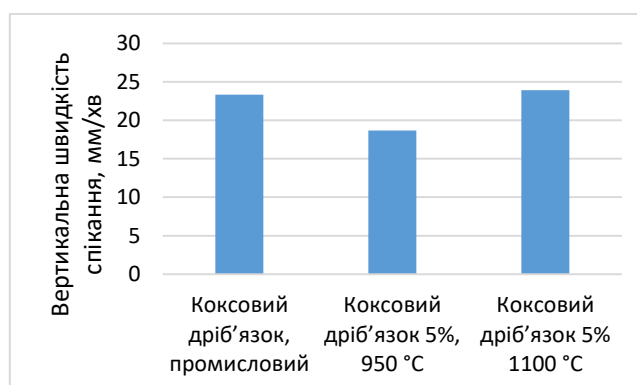
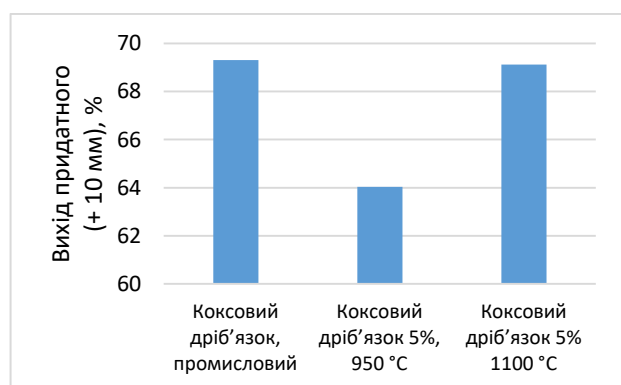
Рис. 1. Схема агломераційної установки

Таблиця 3  
Результати дослідження

| Показник                                      | Тип палива (тип, вміст біоматеріалів, температура піролізу) |                               |                               |                               |                               |                               |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                                               | Коксовий дріб'язок, промисловий                             | Коксовий дріб'язок 5%, 950 °C | Коксовий дріб'язок 5% 1100 °C | Коксовий дріб'язок 15% 850 °C | Коксовий дріб'язок 30% 850 °C | Коксовий дріб'язок 45% 850 °C |
| Вихід придатного (+ 10 мм), %                 | 69,31                                                       | 64,04                         | 69,12                         | 68,84                         | 60,09                         | 56,91                         |
| Вертикальна швидкість спікання, мм/хв         | 23,33                                                       | 18,67                         | 23,92                         | 24,87                         | 25,91                         | 27,05                         |
| Питома продуктивність, т/м <sup>2</sup> ·год  | 1,40                                                        | 1,04                          | 1,41                          | 1,43                          | 1,31                          | 1,26                          |
| Початкова швидкість фільтрації, м/с           | 1,51                                                        | 1,65                          | 1,61                          | 1,74                          | 1,84                          | 1,94                          |
| Кінцева швидкість фільтрації, м/с             | 2,35                                                        | 2,63                          | 2,54                          | 3,00                          | 3,28                          | 3,74                          |
| Міцність агломерату на зтирання, % (- 0,5 мм) | 2,70                                                        | 2,91                          | 2,87                          | 3,10                          | 3,05                          | 2,98                          |
| Міцність агломерату на удар, % (+ 5 мм)       | 82,40                                                       | 80,10                         | 81,20                         | 80,01                         | 72,03                         | 56,70                         |
| Відновлюваність агломерату, %                 | 69,20                                                       | 69,90                         | 68,10                         | 70,30                         | 72,10                         | 77,40                         |

На рисунку 3 показані зміни виходу придатного агломерату, вертикальної швидкості спікання, питомої продуктивності, швидкості фільтрації газу, міцності агломерату та його відновлюваності при

використанні в якості палива коксового дріб'язку з вмістом біоматеріалів 15 - 45 %, отриманих при температурі 850 °C.



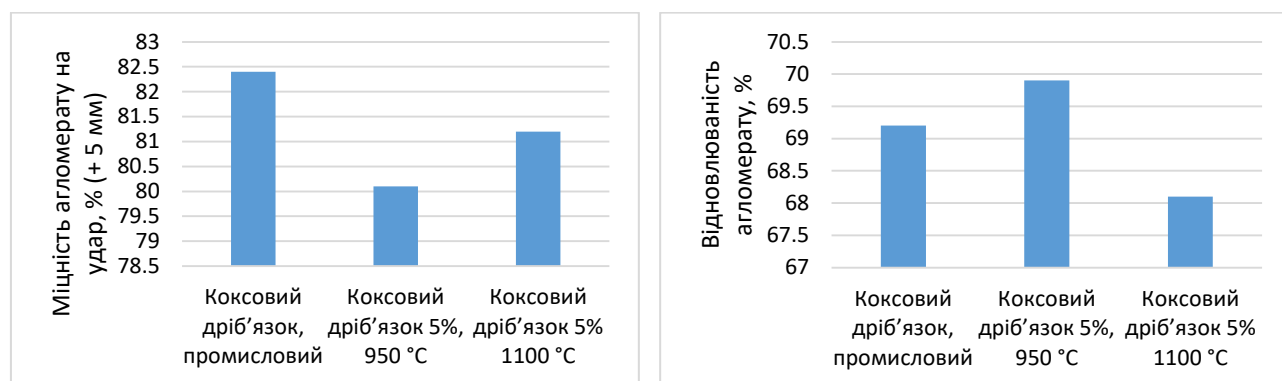


Рис. 3. Зміна основних параметрів агломераційного процесу та якості агломерату при використанні коксового дріб'язку з 5 % біоматеріалів.

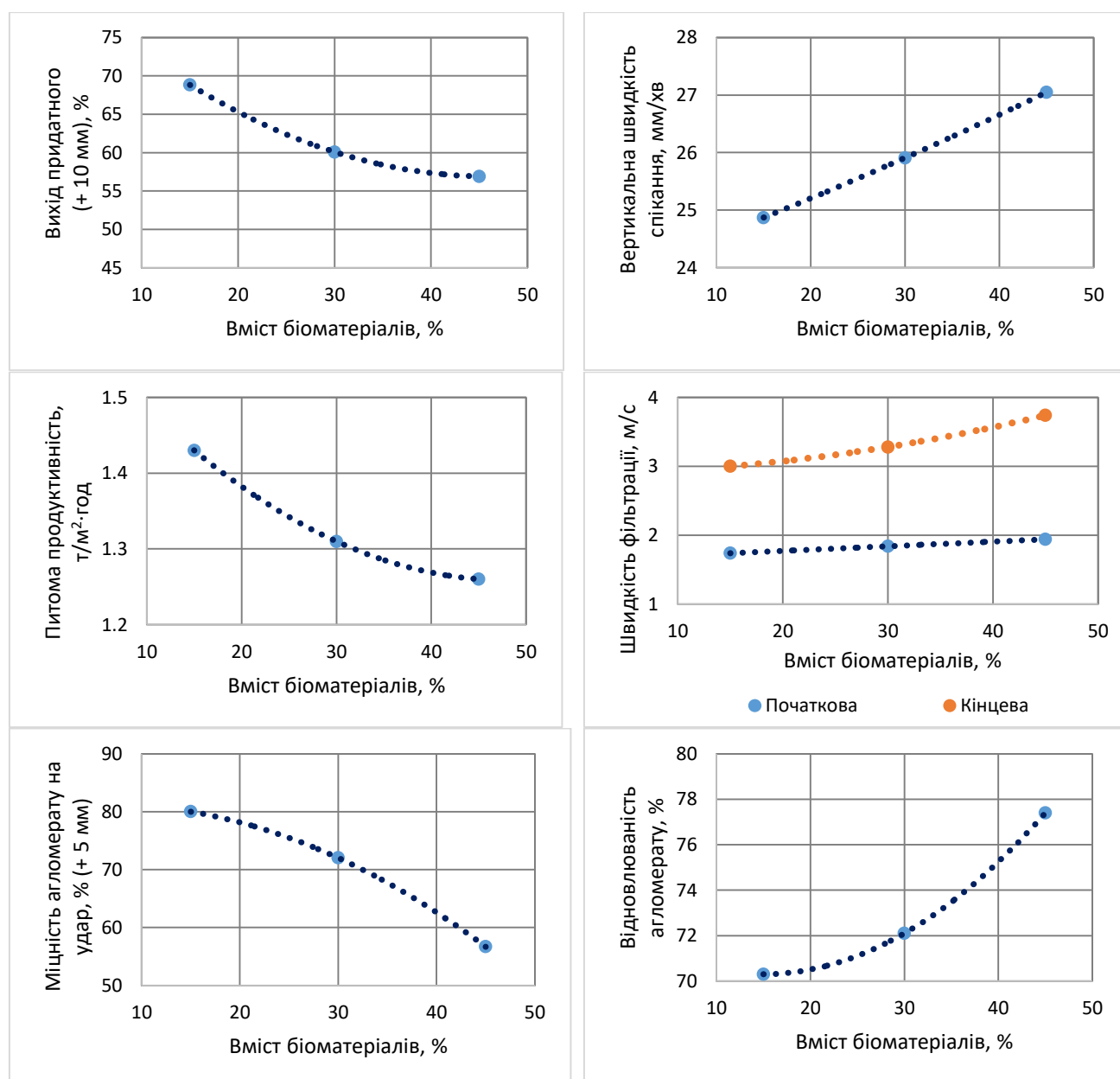


Рис. 3. Зміна основних параметрів агломераційного процесу та якості агломерату при використанні коксового дріб'язку з 15 - 45 % біоматеріалів.

## Обговорення результатів

Проведені дослідження показали, що зі збільшенням температури піролізації при виробництві коксового дріб'язку з додаванням біоматеріалів, спостерігається поліпшення характеристик міцності агломерату. Так, при температурі піролізу 950 °C міцність на удар отриманого агломерату становить 80,1 %, а при температурі піролізації 1100 °C міцність агломерату досягає 81,2 %, що дещо поступається міцності, отриманій при використанні промислового коксового дріб'язку – 82,4 %. Це можна пояснити кращими умовами спікання залізородних матеріалів навколо частинок палива під час його горіння.

З підвищенням температури піролізу в коксовому дріб'язку міститься менша кількість летких речовин, які не згоряють біля частинок палива, питомо теплота згоряння підвищується. Більша кількість теплоти сприяє утворенню навколо частки міцнішого локального спеку. Слід врахувати, що ця тенденція спостерігалася не тільки для коксового дріб'язку з додаванням біоматеріалів, але і для вугільного коксу при підвищенні температури піролізу.

Аналогічний результат спостерігався зі збільшенням вмісту біоматеріалів у коксовому дріб'язку. При цьому збільшення вмісту біоматеріалів з 15 до 45% різко знижувало міцність агломерату, так як частинки коксовому дріб'язку з великим вмістом біоматеріалів не забезпечували необхідний тепловий рівень у зоні спікання на потрібний період часу. Більш пористий та реакційно активний коксовий дріб'язок з великим вмістом біоматеріалів згорає за менший проміжок часу, ніж необхідно для утворення достатньої кількості розплаву в зоні спікання та просочення ним великих часток залізородних матеріалів. Інтенсивне горіння частки палива сприяє розплавленню прилеглих матеріалів та утворенню великої пори, при цьому розташовані між частками палива залізородні матеріали беруть участь у процесі рідкофазного спікання в незначній мірі.

Як результат швидшого згоряння частинок палива, спостерігалось зростання вертикальної швидкості спікання при використанні коксового дріб'язку з біоматеріалами з 23,33 мм/хв базового значення до 27 мм/хв при використанні коксового дріб'язку з 45 % біоматеріалів. У зв'язку з утворенням неміцної пористої структури відбувалося зниження виходу придатного агломерату з 69,31 до 56,91 %, що не дозволяло збільшити продуктивність установки і вона знижувалася з 1,4 т/м<sup>2</sup>·год до 1,26 т/м<sup>2</sup>·год.

Утворення структури з великими каналами в шарі, що спікається при використанні коксового дріб'язку з вмістом біоматеріалів 30 - 45 % підтверджується вимірами швидкості фільтрації газів крізь шар матеріалів на початку і в кінці спікання.

Якщо початкове значення швидкості фільтрації для всіх шихт варіювалося в діапазоні 1,5 - 1,9 м/с, кінцеві значення для більшості шихт становили 2,35 - 2,63 м/с, а при використанні коксового дріб'язку з високим вмістом біоматеріалів становили 3,28 - 3,74 м/с.

Використання коксового дріб'язку з біоматеріалами підвищує відновлюваність отриманих агломератів. Так для дослідів з промисловим коксовим дріб'язком відновлюваність варіювалася в діапазоні 68,2 - 69,2 %, а при використанні коксового дріб'язку з біоматеріалами – 68,1 - 77,4 %. При цьому значне зростання відновлюваності агломератів спостерігалось зі збільшенням частки біоматеріалів у коксовому дріб'язку до 30 – 45 %. Отриманий у таких умовах агломерат мав пухку, сильнопористу структуру, яка позитивно позначалася з його відновлюваності. Однак низька міцність на удар на рівні 56,7 % не дозволяє використовувати отриманий продукт доменної печі.

## Висновки

1. Експериментально вивчено вплив коксового дріб'язку, отриманого при температурах піролізації 850, 950 і 1100 °C з додаванням 5 – 45 % біоматеріалів, на процес агломерації залізородних матеріалів та властивості одержаного агломерату. Встановлено, що при використанні коксового дріб'язку, отриманого при температурі 1100 °C з добавкою 5 % біоматеріалів, показники агломераційного процесу та якості продукту відповідають таким, що є при використанні промислового коксу. При використанні коксового дріб'язку, отриманого при температурі 850 °C з добавкою 15 % біоматеріалів спостерігається зростання питомої продуктивності агломераційної установки. При цьому знижується на 2,39% міцність агломерату на удар і підвищується відновлюваність агломерату на 1,1%.

2. У більшості випадків застосування коксового дріб'язку, отриманого з використанням біоматеріалів, викликає зниження продуктивності агломераційної установки та міцності отриманого агломерату. Максимальне падіння спостерігається при використанні коксового дріб'язку з температурою піролізу 850 °C та вмістом біоматеріалів 45% на 10,2% та 25,7% відповідно.

3. Рекомендується застосування в якості агломераційного палива коксового дріб'язку, отриманого при температурі піролізу 850 °C і вмісті біоматеріалів 15 %. При цьому показники агломераційного процесу та якості агломерату зберігаються на базовому рівню. Застосування коксового дріб'язку, отриманого при температурі піролізу 850 °C дозволить знизити енерговитрати на виробництво палива та зменшить загальний екологічний вплив агломераційного виробництва на довкілля.

## Бібліографічний опис

1. Gan, M.; Fan, X.; Ji, Z.; Chen, X.; Jiang, T.; Li, G.; Yu, Z. Influence of Modified Biomass Fuel on Iron Ore Sintering. *Dry. Roasting Calcining Miner.* 2015, Vol. 30, pp. 241 – 248. doi:10.1002/9781119093329
2. Hu, J.; Wu, M.; Chen, X.; Du, S.; Cao, W.; She, J. Hybrid modeling and online optimization strategy for improving carbon efficiency in iron ore sintering process. *Inf. Sci.* 2019, № 483, pp. 232 – 246. doi:10.1016/j.ins.2019.01.027
3. Bartocci, P.; Wang, L.; Skreiberg, Ø.; Liberti, F.; Bidini, G.; Fantozzi, F. Biocarbon Production and Use as a Fuel. *Biofuels Biorefin.* 2019, Vol. 9, pp. 295 – 324. doi:10.1007/978-981-13-3768-0\_10
4. Ooi, T.C.; Thompson, D.; Anderson, D.R.; Fisher, R.; Fray, T.; Zandi, M. The effect of charcoal combustion on iron-ore sintering performance and emission of persistent organic pollutants. *Combust. Flame.* 2011, № 158, pp. 979 – 987. doi:10.1016/j.combustflame.2011.01.020
5. Demirbaş, A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Convers. Manag.* 2001, № 42, pp. 1357 – 1378. doi:10.1016/S0196-8904(00)00137-0
6. Xie, H.; Li, R.; Yu, Z.; Wang, Z.; Yu, Q.; Qin, Q. Combined steam/dry reforming of bio-oil for H<sub>2</sub>/CO syngas production with blast furnace slag as heat carrier. *Energy.* 2020, № 200, pp. 117 – 481. doi:10.1016/j.energy.2020.117481
7. Kalisz, S.; Ciukaj, S.; Mroczek, K.; Tymoszuik, M.; Wejkowski, R.; Pronobis, M.; Kubiczek, H. Full-scale study on halloysite freside additive in 230 t/h pulverized coal utility boiler. *Energy.* 2015, Vol. 92, pp. 33 – 39. doi:10.1016/j.energy.2015.03.062
8. Ooi, T.C.; Aries, E.; Ewan, B.C.; Thompson, D.; Anderson, D.R.; Fisher, R.; Tognarelli, D. The study of sunflower seed husks as a fuel in the iron ore sintering process. *Miner. Eng.* 2007, Vol. 21, pp. 167–177. doi:10.1016/j.mineng.2007.09.005
9. Lovel, R.; Vining, K.; Dell'Amico, M. Iron ore sintering with charcoal. *Miner. Process. Extr. Metall.* 2007, Vol. 116, pp. 85–92. doi:10.1179/174328507X163887
10. Liu, C.; Zhang, Y.; Zhao, K.; Xing, H.; Kang, Y. Modified biomass fuel instead of coke for iron ore sintering. *Ironmak. Steelmak.* 2020, Vol. 47, pp. 188–194. doi:10.1080/03019233.2018.1507070
11. Liu, C.; Zhang, Y.; Zhao, K.; Xing, H.; Kang, Y. Effect of biomass on reaction performance of sintering fuel. *Energy Mater.* 2019, Vol. 54, pp. 3262–3272. doi:10.1007/s10853-018-3061-2
12. Kieush, L.; Hrubak, A.; Koveria, A.; Boyko, M.; Yabolnyk, M.; Molchanov, L., & Moklyak, V. Influence of biocoke on iron ore sintering performance and strength properties of sinter. *Mining of Mineral Deposits.* 2022, Vol. 16(2), pp. 55-63. doi:10.33271/mining16.02.055
13. Kieush, L.; Koveria, A.; Zhu, Z.Q.; Boyko, M.; Sova, A., & Yefimenko, V. . Application of biomass pellets for iron ore sintering. *Materials Science Forum.* 2021, Vol. 1045, pp. 17-31. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1045.17
14. Kieush, L.; Koveria, A.; Boyko, M.; Hrubak, A.; Sova, A., & Yefimenko, V. Walnut shells as a potential fuel for iron ore sintering. *Materials Science Forum,* Vol. 2021, 1045, pp. 127-140. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1045.127

## References

1. Gan, M.; Fan, X.; Ji, Z.; Chen, X.; Jiang, T.; Li, G.; Yu, Z. Influence of Modified Biomass Fuel on Iron Ore Sintering. *Dry. Roasting Calcining Miner.* 2015, Vol. 30, pp. 241 – 248. doi:10.1002/9781119093329
2. Hu, J.; Wu, M.; Chen, X.; Du, S.; Cao, W.; She, J. Hybrid modeling and online optimization strategy for improving carbon efficiency in iron ore sintering process. *Inf. Sci.* 2019, № 483, pp. 232 – 246. doi:10.1016/j.ins.2019.01.027
3. Bartocci, P.; Wang, L.; Skreiberg, Ø.; Liberti, F.; Bidini, G.; Fantozzi, F. Biocarbon Production and Use as a Fuel. *Biofuels Biorefin.* 2019, Vol. 9, pp. 295 – 324. doi:10.1007/978-981-13-3768-0\_10
4. Ooi, T.C.; Thompson, D.; Anderson, D.R.; Fisher, R.; Fray, T.; Zandi, M. The effect of charcoal combustion on iron-ore sintering performance and emission of persistent organic pollutants. *Combust. Flame.* 2011, № 158, pp. 979 – 987. doi:10.1016/j.combustflame.2011.01.020
5. Demirbaş, A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Convers. Manag.* 2001, № 42, pp. 1357 – 1378. doi:10.1016/S0196-8904(00)00137-0
6. Xie, H.; Li, R.; Yu, Z.; Wang, Z.; Yu, Q.; Qin, Q. Combined steam/dry reforming of bio-oil for H<sub>2</sub>/CO syngas production with blast furnace slag as heat carrier. *Energy.* 2020, № 200, pp. 117 – 481. doi:10.1016/j.energy.2020.117481
7. Kalisz, S.; Ciukaj, S.; Mroczek, K.; Tymoszuik, M.; Wejkowski, R.; Pronobis, M.; Kubiczek, H. Full-scale study on halloysite freside additive in 230 t/h pulverized coal utility boiler. *Energy.* 2015, Vol. 92, pp. 33 – 39. doi:10.1016/j.energy.2015.03.062

8. Ooi, T.C.; Aries, E.; Ewan, B.C.; Thompson, D.; Anderson, D.R.; Fisher, R.; Tognarelli, D. The study of sunflower seed husks as a fuel in the iron ore sintering process. *Miner. Eng.* 2007, Vol. 21, pp. 167–177. doi:10.1016/j.mineng.2007.09.005
9. Lovel, R.; Vining, K.; Dell'Amico, M. Iron ore sintering with charcoal. *Miner. Process. Extr. Metall.* 2007, Vol. 116, pp. 85–92. doi:10.1179/174328507X163887
10. Liu, C.; Zhang, Y.; Zhao, K.; Xing, H.; Kang, Y. Modified biomass fuel instead of coke for iron ore sintering. *Ironmak. Steelmak.* 2020, Vol. 47, pp. 188–194. doi:10.1080/03019233.2018.1507070
11. Liu, C.; Zhang, Y.; Zhao, K.; Xing, H.; Kang, Y. Effect of biomass on reaction performance of sintering fuel. *Energy Mater.* 2019, Vol. 54, pp. 3262–3272. doi:10.1007/s10853-018-3061-2
12. Kieush, L., Hrubciak, A., Koveria, A., Boyko, M., Yaholnyk, M., Molchanov, L., & Moklyak, V. Influence of biocoke on iron ore sintering performance and strength properties of sinter. *Mining of Mineral Deposits.* 2022, Vol. 16(2), pp. 55-63. doi:10.33271/mining16.02.055
13. Kieush, L., Koveria, A., Zhu, Z.Q., Boyko, M., Sova, A., & Yefimenko, V. . Application of biomass pellets for iron ore sintering. *Materials Science Forum.* 2021, Vol. 1045, pp. 17-31. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1045.17
14. Kieush, L., Koveria, A., Boyko, M., Hrubyak, A., Sova, A., & Yefimenko, V. Walnut shells as a potential fuel for iron ore sintering. *Materials Science Forum,* Vol. 2021, 1045, pp. 127-140. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1045.127