

<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-01>

УДК 669.184:622.785:504.06

**Р. М. Руденко**<sup>1,\*</sup>, здобувач третього рівня вищої освіти, ORCID 0009-0008-6207-0107**Є. М. Сігарьов**<sup>1</sup>, д.т.н., професор, ORCID 0000-0002-8229-7877**М. Р. Руденко**<sup>1</sup>, к.т.н. доцент, ORCID 0000-0002-8016-5221**М. А. Кашеев**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, ORCID 0000-0002-0938-4384<sup>1</sup> Дніпровський державний технічний університет\* Автор для листування: [18rudenko@gmail.com](mailto:18rudenko@gmail.com)

## ВПЛИВ КАПІЛЯРНОГО ВСМОКТУВАННЯ ВОЛОГИ НА ФОРМУВАННЯ ГРАНУЛ АГЛОМЕРАЦІЙНОЇ ШИХТИ

**Анотація.** Метою дослідження є визначення впливу вологості та гранулометричного складу компонентів на якість гранулювання агломераційної шихти, а також з'ясування ролі попереднього гранулювання дрібнодисперсних матеріалів (пилу, шлаків, вапна) у формуванні структури шихти та забезпеченні рівномірного її зволоження. На основі експериментальних даних і виробничих спостережень показано, що попереднє гранулювання сприяє зростанню частки міцних гранул оптимальної фракції 3–10 мм, зменшує прояви сегрегації та покращує газопроникність шару. Встановлено закономірності капілярного всмоктування води гранулами різного розміру та визначено її вплив на рівномірність розподілу води у шихті. Запропоновані рекомендації щодо використання попереднього гранулювання спрямовані на підвищення ефективності підготовки шихти та зростання продуктивності агломераційних машин.

**Ключові слова:** агломераційна шихта, гранулювання, вологість, капілярне всмоктування, гранулометричний склад, газопроникність.

**Посилання для цитування:** Вплив капілярного всмоктування води на формування гранул агломераційної шихти / Р. М. Руденко, Є. М. Сігарьов, М. Р. Руденко, М. А. Кашеев // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2025. Вип. 39. С. 4-19.  
<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-01>.

### Постановка проблеми

Проблема підвищення ефективності грануляції складових агломераційної шихти безпосередньо пов'язана з якісною підготовкою дрібнодисперсних компонентів, які становлять значну частку у

© Р. М. Руденко, Є. М. Сігарьов, М. Р. Руденко, М. А. Кашеев, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

сировинному балансі сучасних металургійних комбінатів України.

Відомо, що саме ці фракції визначають ступінь однорідності суміші, стабільність зволоження та газопроникність шару, однак їхня поведінка у процесі зволоження залишається недостатньо контрольованою.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Агломераційне виробництво залишається базовим процесом чорної металургії, що забезпечує переробку дрібних рудних матеріалів у придатний для доменної плавки агломерат. За даними [1, 2], частка агломерату в доменній шихті на сучасних підприємствах перевищує 70 %, що обумовлює вирішальний вплив його якості на техніко-економічні показники доменного виробництва.

Однією з найважливіших проблем підготовки аглошихти є наявність у її складі значної кількості дрібнодисперсних компонентів – пилу агломераційного та доменного виробництв, шламів мокрого очищення газів, вапна та вапняків, а також дрібних класів концентратів і руд. Вони погіршують умови грануляції, знижують газопроникність шару та призводять до підвищеного винесення пилу в аспіраційні системи [3]. Це не лише ускладнює перебіг процесу спікання, а й підвищує екологічне навантаження на навколишнє середовище.

Традиційна схема підготовки аглошихти передбачає зволоження та перемішування дрібнодисперсних фракцій у змішувачах-барабанах без додаткової обробки. У таких умовах дрібні частинки легко злипаються у грудкуваті конгломерати, які швидко руйнуються при подальшому транспортуванні. Це призводить до утворення надлишкової кількості пилу, нерівномірного розподілу вологи та погіршення сипкості матеріалу [4]. В результаті формується шихта з підвищеною часткою некондиційних фракцій (<1 мм), що негативно позначається на газодинамічних умовах у шарі агломерату.

У світовій практиці для вирішення цієї проблеми застосовують різні підходи. Одним із напрямів є використання органічних і неорганічних в'язучих речовин, які сприяють укрупненню дрібнодисперсних частинок [5]. Проте їх застосування часто обмежується високою собівартістю, складністю введення у технологічний процес і можливим негативним впливом на якість агломерату. Іншим шляхом є розробка спеціальних технологічних режимів змішування та зволоження, які дозволяють частково поліпшити грануляційні властивості, проте не вирішують проблеми принципово [6].

Актуальним і перспективним підходом є попереднє гранулювання окремих груп матеріалів. Суть методу полягає у формуванні «міні-окатишів» розміром 2 – 5 мм із пилу, шламів і вапна ще до основного

процесу грануляції. Такі гранули здатні рівномірно вбирати вологу, мають підвищену механічну міцність і забезпечують стабільність структури шихти під час подальшого оброблення [7]. Формування дрібних гранул дозволяє створювати додаткові центри кристалізації, які сприяють ефективнішому нарощуванню гранул у зоні остаточної грануляції.

Результати окремих досліджень [8, 9] свідчать, що застосування попереднього гранулювання сприяє зростанню частки фракції 3 – 10 мм, яка є оптимальною для забезпечення високої газопроникності шару. Крім того, відмічено зменшення пилоутворення на 15 – 20 % та підвищення продуктивності агломераційних машин на 3 – 5 %. Це підтверджує доцільність подальшого вивчення впливу попереднього гранулювання на технологічні та експлуатаційні показники процесу спікання.

Таким чином, удосконалення технології підготовки агломераційної шихти шляхом попереднього гранулювання окремих груп матеріалів є актуальним завданням, яке має як наукове, так і практичне значення.

### **Формулювання мети дослідження**

Метою цієї роботи є дослідження ефективності утворення «міні-окатишів» із пилу, шламів та вапна і оцінка їхнього впливу на грануляційні властивості шихти, структуру агломераційного шару та продуктивність агломераційної машини.

Завдання дослідження – оцінити можливості попереднього гранулювання пилу, шламів та вапна як способу інтенсифікації процесу огрудкування, а саме:

- провести аналіз складу відходів агломераційного виробництва (пилу та шламів), які є найбільш проблемними з точки зору грануляції;
- розробити схему ланцюгу апаратів для попереднього гранулювання та визначити умови утворення «міні-окатишів»;
- дослідити швидкість капілярного всмоктування вологи отриманими гранулами та оцінити їх здатність до рівномірного зволоження;
- визначити вплив попереднього гранулювання на гранулометричний склад аглошихти, зокрема на частку фракції 3–10 мм, яка забезпечує високу газопроникність шару;
- оцінити результати виробничих випробувань із застосуванням попередньо гранульованих компонентів у складі аглошихти та визначити можливий приріст продуктивності агломераційної машини.

### **Виклад основного матеріалу**

У роботі використовувалися відходи агломераційного та конвертерного виробництв, а також традиційні компоненти

агломераційної шихти. Основна увага приділялася дрібнодисперсним фракціям, які зазвичай ускладнюють процес грануляції. До досліджуваних матеріалів належали:

- пил конвертерного виробництва – дрібнодисперсний матеріал із високим вмістом оксидів заліза, що характеризується підвищеною питомою поверхнею і низькою здатністю до самостійного гранулювання;

- шлами мокрого очищення газів – тонкодисперсні відходи з високим вмістом вологи, які при зневодненні формують липкі грудки, погано придатні для рівномірного змішування;

- вапно і вапняк – компоненти, що використовуються як флюси та в'язучі, але при тонкому помелі схильні до швидкого вбирання вологи й утворення грудок;

- зворот – продукт повернення недоспеченої шихти, що використовується як «каркас» для формування гранул;

- концентрат і руда – традиційна основа агломераційної суміші, що характеризується стабільними грануляційними властивостями.

Хімічний склад пилу наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад пилу агломераційного виробництва мас %.

Матеріал	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	S	Інші
Конвертерний пил	7,28	0,80	11,16	65,16	7,00	1,02	0,62	5,10

Для реалізації процесу було розроблено апаратурний ланцюг попереднього гранулювання (рис. 1), який включає такі операції:

- дозування пилу та шламів із бункерів;
- змішування з вапном у співвідношенні, що забезпечує формування міцних гранул;
- зволоження суміші у спеціалізованому барабанному змішувачі-грануляторі;
- класифікацію отриманих гранул за крупністю із відсівом фракцій <2 мм та >5 мм;
- подачу «міні-окатишів» (2 – 5 мм) у загальну агломераційну шихту.

Для характеристики гранул використовували комплекс методів:

- гранулометричний аналіз – визначення фракційного складу за допомогою ситового методу;
- метод капілярного всмоктування – вимірювання швидкості підйому рідини у гранулах різного складу;
- механічна міцність – визначення здатності гранул витримувати статичне навантаження;

- оцінка сипкості – за кутом природного укосу гранульованого матеріалу.

Наведена схема ланцюгу апаратів попереднього гранулювання (рис. 1) відображає послідовність операцій, необхідних для укрупнення дрібнодисперсних компонентів шихти. На першому етапі пил і шлами дозуються з бункерів та змішуються з вапном у співвідношеннях, що забезпечують оптимальні умови для формування гранул. Далі суміш зволожується у барабанному змішувачі-грануляторі, де утворюються первинні агломераційні ядра. Наступним кроком є класифікація гранул із відсівом фракцій менше 2 мм та більше 5 мм. Відібрана фракція «міні-окатишів» (2 – 5 мм) надходить у загальну агломераційну шихту, покращуючи її грануляційні властивості та зменшуючи частку пилу.

Завершальними етапами є класифікація гранул за крупністю та подача їх у загальну агломераційну шихту. Така схема забезпечує рівномірність структури та підвищує придатність дрібнодисперсних матеріалів до подальшої грануляції.

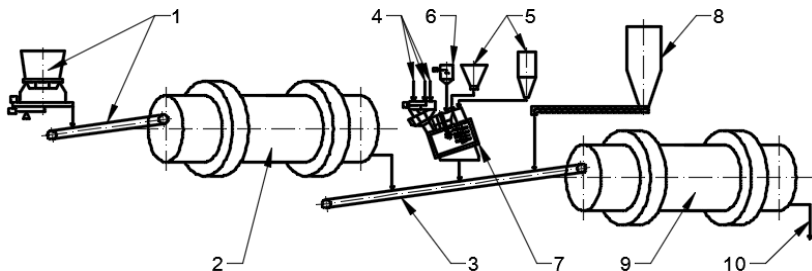


Рисунок 1 – Схема ланцюгу апаратів попереднього гранулювання: 1 – дозувальний пристрій з конвеєрною подачею; 2 – змішувальний пристрій барабанного типу; 3 – конвеєрна подача; 4 – подача залізовмісних відходів (пил агломераційний, конвертерний, електрофільтрів, шлами); 5 – подача добавок флюсу (вапно); 6 – подача води на зволоження для попереднього змішування-огрудкування; 7 – змішувач інтенсивного типу; 8 – бункер коксового дріб'язку з живильником; 9 – огрудковувач барабанного типу; 10 – вивантаження «огрудкованої сировини» в проміжний бункер агломераційної машини.

Додатково проводили аналіз вологоємності та рівномірності зволоження за допомогою контрольного висушування проб у лабораторній печі. Отримані дані використовували для визначення придатності «міні-окатишів» до використання у виробничих умовах.

Процес попереднього гранулювання включає декілька послідовних

стадій (рис. 2). На початковому етапі пил і шлами змішуються з вапном, яке виконує роль в'язучого. Далі відбувається зволоження суміші та утворення дрібних агломераційних ядер.

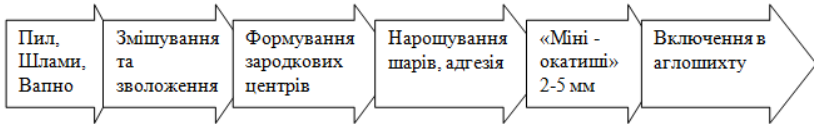


Рисунок 2 – Схема утворення «міні-окатишів» у процесі попереднього гранулювання пилу, шламів і вапна.

На наступних стадіях відбувається нарощування шарів завдяки адгезії частинок, у результаті чого формуються стійкі «міні-окатиші» розміром 2—5 мм.

### **1. Утворення гранул**

Дослідження показали, що попереднє гранулювання пилу, шламів і вапна дозволяє отримати стійкі гранули сферичної та напівсферичної форми діаметром 2—5 мм. Формування відбувається за рахунок спільної дії вологи й вапна, яке виконує роль в'язучого. При оптимальному співвідношенні «пил + шлам + вапно» гранули характеризуються підвищеною механічною міцністю та зберігають структуру навіть після транспортування на стрічкових конвеєрах.

У лабораторних умовах встановлено, що міцність гранул у середньому на 25—30 % перевищує показники аналогічних зразків без попереднього гранулювання. Це особливо важливо для запобігання руйнуванню при змішуванні з основною шихтою.

### **2. Рівномірність зволоження**

Важливим показником якості гранул є їх здатність до рівномірного зволоження. На рис. 3 наведені порівняльні результати дослідження швидкості капілярного всмоктування різними компонентами агломераційної шихти.

На основі аналізу отриманих результатів (рис. 3) підтверджено суттєві відмінності між різними компонентами агломераційної шихти. Якщо концентрат і залізна руда добре вбирають вологу, то пил та інші дрібнодисперсні відходи практично не беруть участі у формуванні стійких гранул. Найвищі значення швидкості зафіксовані у концентраті (12,1 мм/хв) та залізній руді (5,8 мм/хв), тоді як для пилу та дрібних фракцій вказаний показник значно меншої величини (наприклад, для пилу електрофільтрів — 1,3 мм/хв). Це свідчить про низьку здатність дрібнодисперсних відходів до зволоження та необхідність їхнього попереднього гранулювання.

Для дрібнодисперсних відходів, що піддані попередньому

гранулюванню, відмічене суттєве покращення їхньої здатності до вбирання вологи. «Міні-окатиші» формують більш розвинену пористу структуру, яка забезпечує підйом рідини по капілярах і рівномірний розподіл вологи у всьому об'ємі гранули. Це позитивно позначається на стабільності процесу подальшої грануляції та дозволяє знизити частку пересушених або надмірно зволжених фракцій у шихті.

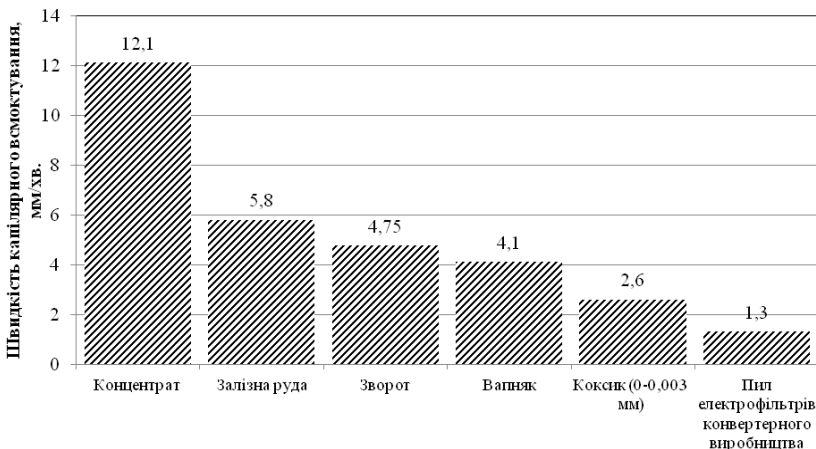


Рисунок 3 – Швидкість капілярного всмоктування різними компонентами агломераційної шихти.

### 3. Вплив на гранулометричний склад

Подальший аналіз гранулометричного складу показав, що, завдяки попередньому гранулюванню, відбувається помітне зниження частки дрібної фракції та зростання частки оптимальної за розмірами.

Як видно з наведених на рис. 4 даних, частка дрібної фракції <1 мм зменшилася з 55,7 % до 33,4 %, що свідчить про істотне зниження надлишкової пилоутворюючої складової. Одночасно відбулося зростання частки оптимальної фракції 3—6 мм з 17,3 % до 39,3 %, яка визначає газопроникність шару та стабільність процесу спікання. Вміст фракцій 1—3 мм (14,7 % → 14,7 %) та 6—12 мм (12,4 % → 12,6 %) залишився практично без змін.

Отримані результати доводять, що застосування «міні-окатишів» сприяє формуванню більш однорідної та рівномірної структури аглошихти, що позитивно позначається на якісних та екологічних показниках агломераційного виробництва.

### 4. Газопроникність шару

Підвищення частки оптимальної фракції безпосередньо

відобразилося на газодинамічних характеристиках шару. У промислових умовах зафіксовано зниження перепаду тиску на 7 – 9 % при однаковій висоті шару. Це свідчить про покращення умов проходження газів крізь шихту та створює передумови для інтенсифікації процесу горіння палива.

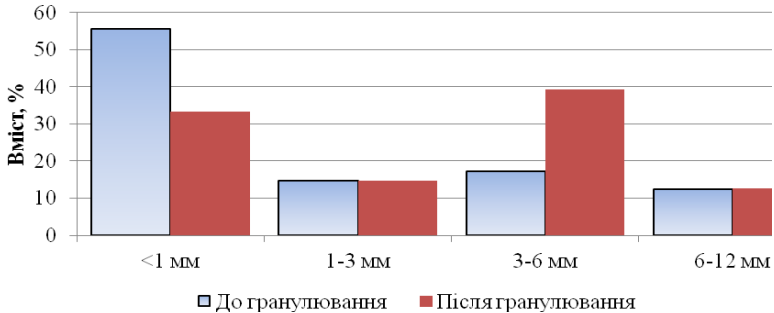


Рисунок 4 – Розподіл агломераційної шихти за класами крупності до та після попереднього гранулювання

### **5. Експериментальні результати**

Порівняння умов використання шихти без попереднього гранулювання та зі збагаченням «міні-окатишами» показало:

- у першому випадку коефіцієнт використання вологи становив ~72 %,
  - у другому – зростав до 88 – 90 %.

Крім того, відмічено зниження втрат дрібних фракцій у пиловловлюючих системах на 12 – 15 %. Це не лише зменшує навантаження на навколишнє середовище, але й дозволяє збільшити ступінь утилізації металовмісних відходів.

### **6. Виробничі випробування**

У дослідно-промислових умовах роботи агломераційної машини типу АКМ-75 було встановлено, що використання попередньо гранульованих компонентів сприяє підвищенню продуктивності машини на 3 – 5 %. При цьому якість агломерату (міцність, вихід кондиційних класів) залишалася стабільною або покращувалася. Окремо відзначено зниження пилоутворення в газоочисних системах, що має важливе значення в умовах сучасних екологічних вимог.

### **7. Порівняння з іншими методами**

На відміну від традиційних підходів, що передбачають лише додаткове зволоження або використання дорогих органічних в'язучих, запропонована технологія не вимагає суттєвих змін у виробничій схемі. Вона базується на використанні внутрішніх (власних) техногенних

відходів комбінату та дешевих природних матеріалів (вапна), що робить її економічно доцільною.

Для узагальнення результатів дослідження у табл. 2 наведено порівняння основних показників агломераційної шихти до та після попереднього гранулювання. Видно, що, завдяки формуванню «міні-окатишів», суттєво зменшується частка дрібної фракції, зростає оптимальна фракція 3 – 6 мм, покращується газопроникність шару, знижується пилоутворення та підвищується коефіцієнт використання вологи. Виробничі випробування підтвердили зростання продуктивності агломераційної машини на 3 – 5 %.

Таблиця 2 – Порівняння основних показників агломераційної шихти до та після попереднього гранулювання.

Показник	До гранулювання	Після гранулювання	Зміна, %
Частка фракції <1 мм, %	55,7	33,4	-22,3
Частка фракції 3–6 мм, %	17,3	39,3	+22,0
Газопроникність шару, ΔР, %	100	91–93	-7...-9 покращ.
Коефіцієнт використання вологи, %	72	88–90	+16...+18
Втрати пилу у газоочистці, %	100	85–88	-12...-15
Продуктивність агломашини, %	100	103–105	+3...+5

Процес зволоження агломераційної шихти описується законом Washburn [1]:

$$L^2 = \frac{r \cdot \gamma \cdot \cos \Theta}{2 \cdot \mu} \cdot \tau$$

де  $L$  – глибина проникнення вологи;  $r$  – ефективний радіус пори;  $\gamma$  – поверхневий натяг;  $\theta$  – крайовий кут змочування;  $\mu$  – в'язкість;  $\tau$  – час.

Розрахунками з використанням рівняння 1 визначено довжину просування рідини в капілярах протягом 60 с, а також встановлено відповідний об'єм вологи, що всмоктується. На основі виконаних розрахунків встановлено, що для пор із радіусом 10–20 мкм за 2–5 с глибина проникнення становить 0,5–1,2 мм. Отримані результати підтверджують інтенсивність капілярного насичення дрібнодисперсних частинок. Зі збільшенням радіуса капіляра довжина просування рідини зростає, що узгоджується з рівнянням Washburn і свідчить про вищу швидкість руху рідини у ширших порах (рис. 5).

З метою наочності обидва показники наведені на одному рисунку, причому об'єм вологи відображено у логарифмічному масштабі на осі праворуч. Це дає можливість простежити відмінності в динаміці проникнення рідини та накопичення її об'єму в залежності від

геометричних характеристик капілярів.

Як видно з рис. 5, зі збільшенням радіуса пори довжина просування рідини зростає майже пропорційно закону Washburn. У той же час, об'єм всмоктуваної води демонструє значно стрімкіше зростання, оскільки визначається не лише довжиною просування, але й квадратом радіусу капіляру. Саме тому об'єм збільшується на декілька порядків навіть при відносно невеликому збільшенні розміру пор, що й зумовило використання логарифмічного масштабу. Отримані результати підкреслюють важливість урахування структури пор матеріалу при аналізі його вологоємності та капілярних властивостей.

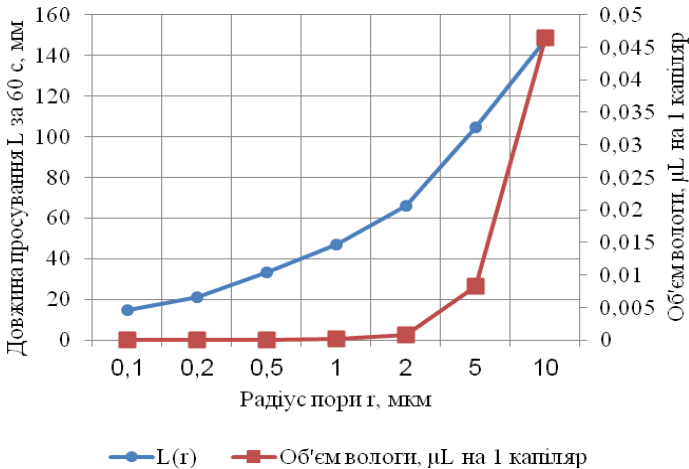


Рисунок 5 – Залежність довжини капілярного просування  $L(r)$  (ліва вісь) та об'єму всмоктуваної води  $V(r)$  (права вісь, логарифмічна шкала) від радіуса пори.

Якщо ж говорити про реальний агломераційний матеріал, то середня глибина проникнення води у шматочок шихти залежить не тільки від капілярів, а й від структури гранули (мікропори всередині гранул, контакти між частинками, тріщинки тощо). Тому реальна «ефективна глибина» зазвичай менша за теоретичну.

Отримані результати дозволяють оцінити не лише об'єм всмоктуваної води, але й глибину її проникнення в капілярну систему шихти.

Згідно з розрахунками, за 60 секунд вода проникає в капіляри діаметром 0,1 – 0,2 мкм на глибину лише 1 – 2 мм, тоді як у порах розміром 5 – 10 мкм глибина досягає понад 1 см. Це свідчить про суттєву різницю у вологоємності та швидкості зволоження, залежно від гранулометричних характеристик матеріалу.

Для аналізу динаміки зволоження побудовано залежність глибини капілярного проникнення вологи від часу при різних ефективних радіусах пор (рис. 6).

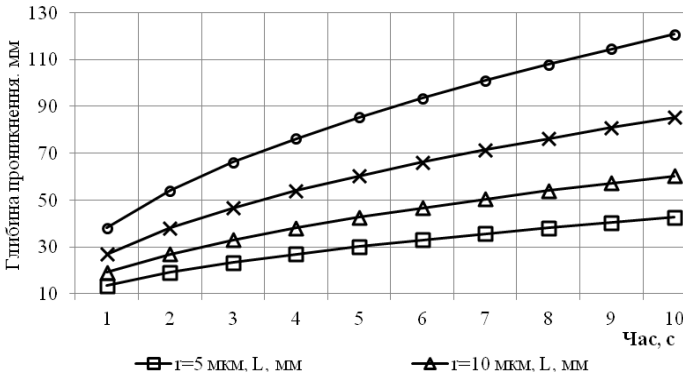


Рисунок 6 – Капілярне всмоктування: залежність глибини проникнення  $L$  від часу для різних ефективних радіусів пор.

Це дозволяє оцінити швидкість насичення шихти водою та визначити вплив структури пор на процес зволоження.

Встановлено (рис. 6), що:

- при малих порах (~5 мкм) проникнення вологи відбувається повільніше, і навіть за десятки секунд глибина не перевищує кількох міліметрів;
- при більших порах (20 – 40 мкм) процес насичення відбувається значно швидше: за перші 10 секунд волога здатна проникати на глибину кількох міліметрів, що забезпечує інтенсивне зволоження поверхневих шарів гранул.

Таким чином, зі збільшенням розміру пор суттєво зростає швидкість капілярного просування рідини, що свідчить про вирішальну роль мікроструктури гранул у формуванні рівномірного розподілу вологи в агломераційній шихті.

### **8. Вплив параметрів гранулювання на введення вторинних матеріалів.**

Розрахунки показали, що оптимізація параметрів (вологість 7,5 – 9,0 %, швидкість обертання барабана 12 – 14 об/хв, ступінь заповнення 22 – 26 %) дозволяє підвищити частку вторинних матеріалів (шламів, пилу) до 25 – 30 % без погіршення гранулометричних характеристик. Орієнтовно це забезпечує зниження утворення пилу на 5 – 10 % у порівнянні з базовим режимом.

У ході дослідження оцінено можливості залучення вторинних

матеріалів (шлами, пил, відходи газоочистки) до складу агломераційної шихти. Визначено граничну частку їх введення без погіршення гранулометричних характеристик та стійкості гранул.

Розрахункові формули отримано методом найменших квадратів, точність апроксимації підтверджується високим коефіцієнтом детермінації  $R^2 > 0,93$ .

Максимальна частка вторинних матеріалів  $S(\varphi, n)$ , %:

$$S(\varphi, n) = -8,93 + 0,50 \varphi + 0,925 n,$$

де  $\varphi$  – ступінь заповнення барабану, % ;  $n$  – швидкість обертання гранулятора барабанного типу, об./хв.

Для узагальнення результатів побудовано емпіричну залежність максимальної частки вторинних матеріалів у шихті при вологості  $\omega = 8,5$  %. Отримані дані подано у вигляді ізолінійної діаграми (рис. 7), що наочно відображає вплив ступеня заповнення барабану та швидкості його обертання на можливість залучення вторинних ресурсів. Збільшення частки вторинних матеріалів у шихті до обґрунтованого рівня сприятиме досягненню істотного зниження пилових викидів (у межах 10 – 25 % залежно від типу добавки) (рис. 7).

Це підкреслює подвійний позитивний ефект застосування вторинних ресурсів: підвищення економічної ефективності виробництва за рахунок утилізації відходів та зменшення екологічного навантаження на навколишнє середовище.

Цифри у кривих – максимальні частки вторинних матеріалів, %.

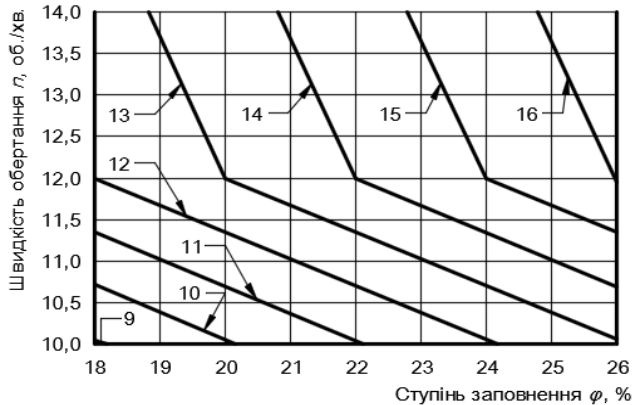


Рисунок 7 – Ізолінійна діаграма максимальної частки вторинних матеріалів при вологості  $\omega = 8,5$  %.

## Висновки

1. Якість гранул аглошихти визначається поєднанням вологості, швидкості обертання гранулятора та ступеня заповнення барабана. Робочий діапазон, підтверджений експериментальними дослідженнями: вологість 7,5 – 9,0 %, швидкість 12 – 14 об/хв, ступінь заповнення 22 – 26 %.

2. Удосконалений процес гранулювання сприяє зростанню частки міцних гранул фракції 3 – 10 мм, підвищує газопроникність шару, зменшує утворення дрібнодисперсного пилу та оксидів сірки, що покращує екологічні умови роботи агломераційних машин.

3. Встановлено, що параметри капілярного всмоктування (радіус пор, час) визначають глибину проникнення вологи та рівномірність її розподілу у гранулах. Більші пори прискорюють змочування та стабілізують структуру шихти.

4. Встановлено взаємозв'язок між параметрами гранулювання, характеристиками капілярного всмоктування та максимальною часткою вторинних матеріалів у складі агломераційної шихти; запропоновано комплексний підхід до оцінки процесу підготовки шихти, який поєднує експериментальні дослідження, математичне моделювання (рівняння Washburn) та емпіричні залежності; доведено можливість підвищення частки вторинних матеріалів до 25 – 30 % без втрати стабільності гранул і погіршення газодинамічних характеристик шару; вперше сформовано режимні карти у вигляді ізолінійних діаграм, що дозволяють інженерно обґрунтовувати оптимальні режими гранулювання та визначати допустимий вміст вторинних ресурсів.

5. Побудована емпірична залежність  $S(\varphi, n)$  та ізолінійна діаграма узагальнюють результати дослідження і дають інструмент для оперативного визначення допустимої частки вторинних матеріалів у складі аглошихти. Це дозволяє гнучко налаштовувати режими гранулювання під конкретний склад шихти та створює передумови для промислової реалізації технології.

## Перелік посилань

1. Ting J.-M., Lin R.-Y. Effect of particle-size distribution on sintering – Part I: Modelling. *Journal of Materials Science*. 1994. Vol. 29, No. 7. P. 1867–1872. <https://doi.org/10.1007/BF00351306>
2. An X., Yang R., Zou R., Yu A. Effect of vibration condition and inter-particle frictions on the packing of uniform spheres. *Powder Technology*. 2008. Vol. 188. P. 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.056>
3. Umadevi T., Bhandopadhyay U. K., Mahapatra P. C., Prabhu M., Ranjan M. Influence of limestone particle size on iron ore sinter properties and productivity. *Steel Research International*. 2010. Vol. 81, No. 6. P. 425–433.

<https://doi.org/10.1002/srin.201000020>

4. Zhang H., Bai K., Liu W., Zhang Z., Kou M. *Effect of magnetite concentrate particle size on pellet oxidation roasting process and compressive strength*. ISIJ International. 2022. Vol. 62, No. 6. P. 1207–1216. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-628>

5. Bjørk R., Tikare V., Frandsen H. L., Pryds N. The effect of particle size distributions on the microstructural evolution during sintering. *Journal of the American Ceramic Society*. 2013. Vol. 96, No. 1. P. 103–110. <https://doi.org/10.1111/jace.12100>

6. Aladejebi O. A., Mitra S., Singh T., Pinson D. J., Chew S., Honeyands T. Effect of ultrafine iron ore addition on green bed properties and sinter productivity. *ISIJ International*. 2025. Vol. 65, No. 7. P. 937–947. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-374>

7. Kawatra S. K., Claremboux V. Granulation fundamentals and applications in iron ore sintering. *Minerals Engineering*. 2020. Vol. 146. Art. 106136. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106136>

8. Oliveira V. de M., Domingues A. L. A., Bagatini M. C., Resende, V. G. de. Granulation behavior of an iron ore sintering mixture containing high-grade pellet feed with different specific surface. *ISIJ International*. 2020. Vol. 60, No. 11. P. 2376–2384. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-023>

9. You Y., Guo J., Zheng Z., Li G., Li Y., Lv X., Yang R. Comparisons of iron ore granulation and sintering performance between horizontal high-shear granulators and drum granulators. *Powder Technology*. 2022. Vol. 409. Art. 117367. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117367>

## References

1. Ting, J.-M., & Lin, R.-Y. (1994). Effect of particle-size distribution on sintering – Part I: Modelling. *Journal of Materials Science*, 29 (7), 1867–1872. <https://doi.org/10.1007/BF00351306>

2. An, X., Yang, R., Zou, R., & Yu, A. (2008). Effect of vibration condition and inter-particle frictions on the packing of uniform spheres. *Powder Technology*, 188, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.056>

3. Umadevi, T., Bandopadhyay, U. K., Mahapatra, P. C., Prabhu, M., & Ranjan, M. (2010). Influence of limestone particle size on iron ore sinter properties and productivity. *Steel Research International*, 81(6), 425–433. <https://doi.org/10.1002/srin.201000020>

4. Zhang, H., Bai, K., Liu, W., Zhang, Z., & Kou, M. (2022). *Effect of magnetite concentrate particle size on pellet oxidation roasting process and compressive strength*. *ISIJ International*, 62(6), 1207–1216. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-628>

5. Bjørk, R., Tikare, V., Frandsen, H. L., & Pryds, N. (2013). The effect of particle size distributions on the microstructural evolution during sintering. *Journal of the American Ceramic Society*, 96 (1), 103–110. <https://doi.org/10.1111/jace.12100>

6. Aladejebi, O. A., Mitra, S., Singh, T., Pinson, D. J., Chew, S., & Honeyands, T. (2025). Effect of ultrafine iron ore addition on green bed properties and sinter productivity. *ISIJ International*, 65 (7), 937–947.

<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-374>

7. Kawatra, S. K., & Claremboux, V. (2020). Granulation fundamentals and applications in iron ore sintering. *Minerals Engineering*, 146, 106136. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106136>

8. Oliveira, V. de M., Domingues, A. L. A., Bagatini, M. C., & Resende, V. G. de. (2020). Granulation behavior of an iron ore sintering mixture containing high-grade pellet feed with different specific surface. *ISIJ International*, 60 (11), 2376–2384. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-023>

9. You, Y., Guo, J., Zheng, Z., Li, G., Li, Y., Lv, X., & Yang, R. (2022). Comparisons of iron ore granulation and sintering performance between horizontal high-shear granulators and drum granulators. *Powder Technology*, 409, 117367. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117367>

**R. M. Rudenko**<sup>1,\*</sup>, Ph. D. Student, ORCID 0009-0008-6207-0107

**Ye. M. Sigarev**<sup>1</sup>, D. Sc. (Tech.), Professor, Head of the Department of Metallurgy, ORCID 0000-0002-8229-7877

**M. R. Rudenko**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-8016-5221

**M. A. Kashcheev**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-0938-4384

<sup>1</sup> *Dniprovsky State Technical University*

\* *Corresponding author: 18rudenko@gmail.com*

## **IMPACT OF CAPILLARY MOISTURE UPTAKE ON THE FORMATION OF IRON ORE SINTER MIX GRANULES**

**Abstract.** The research focuses on determining main factors that affect quality granulation of iron ore sinter mix. Granulation is a crucial stage in sintering technology, since strength, size distribution, and gas permeability of granules directly influence bed resistance, flame front stability, and overall productivity of the sintering machine. Based on both experimental studies and theoretical analysis, role of moisture content, drum operating parameters, and pore structure characteristics has been clarified. It has been demonstrated that preliminary granulation of fine fractions (dust, sludges, lime, and other secondary raw materials) significantly improves the uniformity granule structure. Capillary absorption tests showed that concentrates, ores, and waste products differ considerably in water uptake, which is mainly due to variations in pore radius. According to the Washburn equation, smaller pores limit penetration depth and reduce moisture distribution, whereas larger pores accelerate water movement and ensure better wetting of the charge. Calculated data indicate that at pore sizes of 5  $\mu\text{m}$  the penetration depth does not exceed 2 mm within 10 s, while at 20 – 40  $\mu\text{m}$  moisture spreads several millimeters during the same period. These results confirm the necessity of pre-granulating fine wastes with poor wettability in order to stabilize the structure of the sinter mix. Optimization of granulation parameters has been carried out. The most favorable regime corresponds to a moisture content of 7.5 – 9.0 %, drum speed of 12 – 14 rpm, and fill degree of 22 – 26 %. Under these conditions, strong and uniform granules with a dominant fraction of 3 – 6 mm are formed. The fraction below 1 mm

decreases from more than 40 % to approximately 24 %, which considerably lowers dust generation during sintering. The obtained results also prove that the use of preliminary granulation makes it possible to introduce up to 25 – 30 % of secondary materials without deterioration of granule stability. At the same time, dust emissions are reduced by 5 – 10 % and the environmental performance of sintering is improved. The novelty of this work consists in establishing the relationship between moisture absorption mechanisms and the stability of granules, and in proving the possibility of increasing the share of secondary raw materials in the charge while simultaneously reducing the ecological footprint of agglomeration.

**Key words:** sinter mix; granulation; moisture content; capillary absorption; particle size distribution; bed permeability.

**For citation:** Rudenko, R. M., Sigarev, Ye. M., Rudenko, M. R., & Kashcheev, M. A. (2025). Impact of capillary moisture uptake on the formation of iron ore sinter mix granules. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 39, 4-19. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-01>

*Рукопис надійшов до редакції / Received 29.07.2025*  
*Рекомендовано до друку / Accepted 21.10.2025*