

Р.М. Руденко, аспірант кафедри металургії ім. проф. В.І. Логінова,
e-mail: 93rudenko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-6207-0107>

Є.М. Сігарьов, д-р техн. наук, професор, зав. кафедри металургії ім. проф. В.І. Логінова,
e-mail: siharovyevgen@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8229-7877>

М.Р. Руденко, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри металургії ім. проф. В.І. Логінова,
e-mail: 18rudenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8016-5221>

М.А. Кащев, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри металургії ім. проф. В.І. Логінова,
e-mail: pmz@pmz.dp.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0938-4384>

О.А. Чубіна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри металургії ім. проф. В.І. Логінова,
e-mail: ms.chubina@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2213-5013>

Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

Геометрично-параметричне моделювання формування зон сегрегації при штабелюванні залізорудної шихти

Статтю присвячено геометрично-параметричному моделюванню процесу формування зон сегрегації під час штабелювання залізорудної шихти на складах усереднення агломераційних фабрик. Нерівномірний розподіл частинок за розмірами та густиною у штабелі є однією з основних причин коливань хімічного складу шихти, що негативно впливає на стабільність агломераційного процесу та якість готового агломерату. Метою роботи є встановлення аналітичної залежності між технологічними параметрами штабелювання та об'ємом зон сегрегації, які визначають ступінь однорідності складу шихти перед подачею на агломераційну машину. Для досягнення цієї мети застосовано методику поєднання геометричного аналізу та параметричного моделювання руху частинок шихти уздовж вільної поверхні штабеля з урахуванням кута природного укосу, висоти скидання матеріалу та швидкості подачі конвеєра. На основі аналітичного опису траєкторій ковзання частинок запропоновано узагальнену геометрично-параметричну залежність, що пов'язує об'єм зон сегрегації з основними технологічними факторами штабелювання. Коефіцієнти моделі визначено шляхом параметричного підбору за результатами моделювання, що відповідають промисловим умовам агломераційного виробництва. Отримані результати дозволили кількісно оцінити вплив кожного параметра на інтенсивність сегрегації та визначити раціональні режими формування штабеля. Встановлено, що одностороння схема укладання забезпечує зменшення довжини шляхів ковзання частинок і зниження об'єму зон сегрегації у 1,8–2 рази порівняно із симетричним укладанням. Запропонована модель може бути використана для інженерного прогнозування рівня неоднорідності шихти, оптимізації режимів штабелювання та підвищення стабільності агломераційного процесу без застосування ресурсоємних чисельних методів моделювання.

Ключові слова: шихта, агломерація, штабелювання, сегрегація, усереднення, параметричне моделювання, траєкторія.

Вступ. Підготовка сировини до агломераційного процесу є одним із ключових етапів, що визначає стабільність хімічного складу та якість готового агломерату. Незважаючи на високий рівень автоматизації сучасних фабрик, значна частина коливань у складі агломераційної шихти виникає саме на стадії її штабелювання та відбору зі штабеля [1—3]. При традиційних схемах двостороннього укладання частинок різної крупності відбувається просторове розшарування (сегрегація), що спричинює локальні відхилення вмісту Fe, SiO₂ та CaO [1—6]. Це, у свою чергу, ускладнює процес усереднення та знижує ефективність подальшого гранулювання і запалювання шихти.

Сегрегація сипких матеріалів під час формування штабеля обумовлена комбінацією геометричних та кінематичних чинників: кута природного укосу частинок, висоти скидання, швидкості подачі конвеєра та способу руху штабелеукладача. У результаті утворюються зони різної гранулометрії й щільності, які практично неможливо повністю усунути навіть при застосуванні роторних реклаймерів чи комбінованих систем відбору. Тому актуальним є створення простих аналітичних моделей, що дозволяють оцінити обсяг і конфігурацію зон сегрегації залежно від технологічних параметрів штабелювання.

Раніше дослідження процесів сегрегації переважно базувалися на експериментальних спостереженнях або чисельному моделюванні методами DEM та CFD, що потребує значних обчислювальних ресурсів. У даній роботі запропоновано спрощений геометрично-параметричний підхід, який дозволяє без складного моделювання оцінити закономірності формування неоднорідності складу в штабелі залізорудної шихти. Отримані залежності можуть бути використані для оптимізації процесу штабелювання з метою зниження варіацій хімічного складу шихти та підвищення стабільності агломераційного виробництва.

Постановка проблеми у загальному вигляді.

У процесі штабелювання залізорудних матеріалів одним із ключових чинників, що впливають на якість усереднення шихти, є нерівномірний розподіл частинок різної крупності та густини по висоті й довжині штабеля. Сегрегація, яка виникає під час падіння матеріалу з конвеєра, призводить до утворення зон різного хімічного складу, що в подальшому негативно позначається на стабільності складу агломераційної шихти.

Відомі способи зменшення сегрегації передбачають зміну схеми укладання (симетричної, односторонньої, багат шарової), однак вони не враховують реальних технологічних параметрів обладнання — швидкості подачі конвеєра, висоти скидання матеріалу та кута природного укосу сипкої маси. Відсутність кількісного опису впливу цих параметрів ускладнює керування процесом штабелювання й не дозволяє обґрунтовано вибирати оптимальні режими для досягнення необхідного рівня усереднення. Актуальним питанням є розроблення геометрично-параметричної моделі, яка дозволить

кількісно оцінити вплив технологічних факторів на об'єм зон сегрегації та визначити умови мінімізації неоднорідності складу штабеля.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблема сегрегації сипких матеріалів під час формування штабелів детально розглядається у сучасних дослідженнях, присвячених процесам складування та усереднення залізорудної сировини. У роботах останніх років [1—3] запропоновано комплексні підходи до опису механізмів розшарування частинок за крупністю та густиною, що базуються на клітинних автоматах і лабораторних експериментах зі штабелями обмежених розмірів. Зокрема, у дослідженні Ye Z. зі співавторами [1, 2] розроблено тривимірну модель штабеля, яка дозволяє враховувати динаміку розвантаження та траєкторну сегрегацію частинок, а також проведено промислову валідацію отриманих результатів [3]. Отримані залежності підтвердили визначальну роль геометрії штабеля та умов подачі матеріалу у формуванні зон неоднорідності хімічного складу.

Теоретичні основи процесів сегрегації сипких матеріалів у потоках та на вільній поверхні штабелів закладено в роботах, присвячених механіці гранульованих середовищ. Класичні моделі описують кінетичну сегрегацію як результат диференційованого переміщення частинок різної крупності та густини у зсувних шарах матеріалу. У фундаментальних працях Gray, Thornton, Ancey та інших авторів [4—6] розроблено континуальні та глибинно-усереднені підходи, які дозволяють описати розшарування частинок у тонких гранульованих потоках та на схилах насипів. Подальший розвиток цих уявлень представлений у роботах P. Umbanhowar зі співавторами [7], де сегрегація розглядається як результат конкуренції процесів адвекції, дифузії та перерозподілу фракцій у щільних гранульованих середовищах. Зазначені моделі мають високу теоретичну цінність, однак їх практичне застосування до промислових штабелів обмежене через складність урахування реальних геометричних і технологічних параметрів процесу штабелювання.

Значна кількість сучасних досліджень процесів сегрегації зосереджена на застосуванні чисельних методів моделювання, передусім дискретно-елементного методу (DEM) та його поєднання з континуальними підходами. У роботах [8—10] доведено можливість детального відтворення процесів стратифікації та розділення частинок за крупністю під час формування штабелів різної конфігурації. Разом з тим, результати таких моделей істотно залежать від коректності завдання мікропараметрів взаємодії частинок, умов контакту та початкових граничних умов, що ускладнює їх калібрування для промислових умов. Оглядові роботи останніх років також підкреслюють, що DEM-моделювання залишається ресурсоемним інструментом, застосування якого обмежене лабораторними або напівпромисловими масштабами [11]. У зв'язку з цим актуальним є пошук альтернативних підходів, які дозволяють отримувати кількісні оцінки рівня сегрегації з урахуванням реаль-

них технологічних параметрів штабелювання без використання складних чисельних моделей.

Окрему групу досліджень становлять роботи [12, 13], присвячені аналізу ефективності усереднення залізорудної сировини у промислових штабелях типу *blending stockpile*. У цих роботах розглядається вплив схеми формування штабеля, геометричних розмірів та способу відбору матеріалу на варіацію хімічного складу шихти. Показано, що навіть за наявності сучасних реклаймерів повністю усунути неоднорідність складу не вдається, а ступінь усереднення істотно залежить від параметрів укладання матеріалу. Експериментальними дослідженнями штабелів дрібнозернистих залізорудних концентратів [14] підтверджено, що сегрегація відбувається вже на стадії укладання та зберігається протягом усього циклу складування. У дослідженні, присвяченому аналізу промислових даних експлуатації штабелів [15], також наголошується на необхідності врахування реальної геометрії насипу та кінематичних умов подачі матеріалу при оцінці якості усереднення.

Аналіз результатів наведених вище досліджень свідчить, що переважна більшість існуючих моделей або зосереджена на детальному чисельному описі мікромеханіки руху частинок, або базується на узагальнених статистичних оцінках ефективності усереднення без прямого зв'язку з конкретними технологічними параметрами штабелювання. При цьому у практиці агломераційного виробництва ключове значення мають такі керовані фактори, як кут природного укосу матеріалу, висота скидання та швидкість подачі конвеєра, вплив яких у переважній більшості робіт розглядається опосередковано або фрагментарно [16, 17]. Дані сучасних експериментальних та чисельно-аналітичних досліджень також підкреслюють необхідність спрощених інженерних моделей, здатних забезпечити кількісну оцінку рівня сегрегації без застосування ресурсоємних DEM- та CFD-розрахунків [18]. У цьому контексті актуальним є розроблення геометрично-параметричної моделі процесу штабелювання, яка поєднує геометрію штабеля з кінематичними умовами подачі матеріалу та дозволяє прогнозувати об'єм зон сегрегації в умовах промислового агломераційного виробництва.

Разом з тим, практичне регулювання процесу штабелювання в умовах агломераційного виробництва вимагає урахування конкретних параметрів обладнання, зокрема кута природного укосу матеріалу φ , висоти скидання h_0 та швидкості руху конвеєра v . Саме ці параметри визначають геометрію формування штабеля та кінематичні умови переміщення частинок уздовж його схилу. Тому актуальним є розширення існуючих геометричних підходів у напрямі параметричного аналізу впливу технологічних факторів, що дозволяє не лише описати процес формування штабеля, але й створити основу для керування рівнем сегрегації з урахуванням вимог до усереднення залізорудної шихти.

Метою дослідження є розроблення геометрично-параметричної моделі процесу штабелювання залізорудної шихти, яка дозволяє кількісно оцінити

вплив технологічних параметрів на формування зон сегрегації та може бути використана для прогнозування рівня неоднорідності складу шихти у штабелі перед агломерацією.

Об'єктом дослідження є процес штабелювання залізорудної шихти на складі усереднення в умовах агломераційного виробництва.

Предметом дослідження є закономірності формування зон сегрегації сипких матеріалів у штабелі залежно від геометрії насипу та кінематичних умов подачі матеріалу.

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачено вирішення таких завдань: аналіз впливу кута природного укосу матеріалу, висоти скидання та швидкості подачі конвеєра на характер формування зон сегрегації у штабелі; створення узагальненої геометрично-параметричної залежності, що пов'язує об'єм зон сегрегації з основними технологічними параметрами штабелювання; параметричне моделювання процесу штабелювання в діапазонах, характерних для промислових умов агломераційних фабрик; оцінка чутливості об'єму зон сегрегації до зміни окремих технологічних факторів та визначення їх відносного внеску; визначення раціонального діапазону параметрів штабелювання, при якому забезпечується мінімальний рівень неоднорідності складу залізорудної шихти.

Матеріали та методи. Методика дослідження базується на поєднанні геометричного та параметричного підходів до опису процесу штабелювання залізорудної шихти на складі усереднення. У межах роботи процес формування штабеля розглядається як послідовне осадження сипкого матеріалу з подальшим переміщенням частинок уздовж поверхні природного укосу під дією сили тяжіння.

У якості визначальних технологічних параметрів процесу штабелювання прийнято кут природного укосу сипкого матеріалу φ , висоту скидання матеріалу h_0 та швидкість подачі конвеєра v . Саме ці параметри формують геометрію штабеля та кінематичні умови руху частинок, що безпосередньо впливають на інтенсивність сегрегації та об'єм зон неоднорідності.

Для кількісної оцінки процесу запропоновано узагальнену геометрично-параметричну залежність, яка пов'язує об'єм зон сегрегації з основними технологічними факторами штабелювання у вигляді функції $V_{seg} = f(\varphi, h, v)$. Коефіцієнти залежності визначались параметричним підбором на основі серії розрахунків у середовищі Mathcad Prime з використанням аналітичного опису руху частинок уздовж схилу штабеля.

Для оцінки рівномірності складу шихти введено інтегральний показник неоднорідності χ , який характеризує середнє відхилення локальної концентрації компонентів від середнього значення по об'єму штабеля. Такий підхід дозволяє порівнювати різні режими штабелювання за єдиним узагальненим критерієм та оцінювати ступінь прояву сегрегації незалежно від абсолютних розмірів штабеля.

Параметричне моделювання виконувалося у діапазонах значень технологічних параметрів, ха-

рактерних для промислових умов агломераційного виробництва. Для кожної комбінації параметрів визначався відносний об'єм зон сегрегації V_{seg}/V_{total} , що використовувався як основний кількісний показник неоднорідності структури штабеля. Результати узагальнювались у вигляді таблиць і графічних залежностей, що дозволило виконати аналіз чутливості об'єму зон сегрегації до зміни окремих технологічних факторів та встановити їх відносний вплив.

Розрахунки виконано за методикою, описаною вище.

Результати. У результаті проведеного геометрично-параметричного моделювання встановлено узагальнену аналітичну залежність для визначення об'єму зон сегрегації при штабелюванні залізорудної шихти, яка має вигляд:

$$V_{seg} = A \cdot \varphi^m \cdot h_0^n \cdot v^p, \quad (1)$$

де A — емпіричний коефіцієнт, що враховує властивості матеріалу; φ — кут природного укосу сипкого матеріалу, градуси; h_0 — висота скидання, м; v — швидкість подачі конвеєра, м/с; m, n, p — показники ступенів, визначені параметрично за результатами моделювання.

Отримана залежність (1) дозволяє виконувати параметричний аналіз процесу штабелювання та кількісно оцінювати вплив окремих технологічних факторів на інтенсивність сегрегації в штабелі. Параметричне моделювання процесу штабелювання виконувалося з урахуванням трьох основних технологічних факторів: кута природного укосу φ , висоти скидання матеріалу h_0 та швидкості подачі конвеєра v . Вплив зазначених параметрів оцінювали за зміною частки об'єму зон сегрегації V_{seg}/V_{total} , що характеризує нерівномірність розподілу компонентів у штабелі.

Значення показника χ використано для порівняльної оцінки ступеня сегрегації за різних режимів штабелювання:

$$\chi = \frac{1}{V_{total}} \int |C(x, y, z) - \bar{C}| dV, \quad (2)$$

де $C(x, y, z)$ — локальна концентрація компонента у точці простору; $\bar{C}$ — середнє значення концентрації по всьому об'єму штабеля; V_{total} — повний об'єм досліджуваної ділянки.

На основі експериментальних даних та аналізу кінематичних умов руху частинок уздовж схилу штабеля оцінку виконували за аналітичною залежністю (1). Моделювання проводилось у діапазонах, що відповідають промисловим умовам агломераційного виробництва: $\varphi = 20-45^\circ$, $h_0 = 2-6$ м, $v = 0,2-0,5$ м/с.

Для кожного набору параметрів розраховувались відносні об'єми зон неоднорідності, що дозволило побудувати поверхню відгуку $V_{seg} = f(\varphi, h_0, v)$ та оцінити внесок кожного фактора окремо. Розрахунки виконувались у середовищі Mathcad Prime та перевірялися

контрольними обчисленнями в Excel, що забезпечило відтворюваність результатів і можливість подальшої практичної верифікації на дослідних штабелях.

Для кожної комбінації параметрів виконувались розрахунки об'єму зон сегрегації V_{seg} та його відносної частки у загальному об'ємі штабеля V_{seg}/V_{total} , що використовувалась як основний кількісний показник неоднорідності структури штабеля.

Вихідні параметри процесу штабелювання та діапазони їх зміни наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Вихідні параметри процесу штабелювання

Параметр	Позначення	Діапазон значень	Одиниці виміру
Кут природного укосу	φ	20—45	град
Висота скидання матеріалу	h_0	2—6	м
Швидкість подачі конвеєра	v	0,2—0,5	м/с
Об'єм штабеля	V_{total}	450—500	м ³

Аналіз результатів моделювання показав, що кут природного укосу сипкого матеріалу φ є одним із визначальних факторів формування зон сегрегації у штабелі. Зі збільшенням значення φ від 20° до 45° спостерігається стійке зростання відносної частки об'єму зон сегрегації V_{seg}/V_{total} в середньому на 80 % (рис. 1). Така закономірність пояснюється збільшенням крутизни схилу штабеля, що призводить до інтенсифікації ковзання крупніших частинок та зростання різниці у гранулометричному складі сформованих шарів.

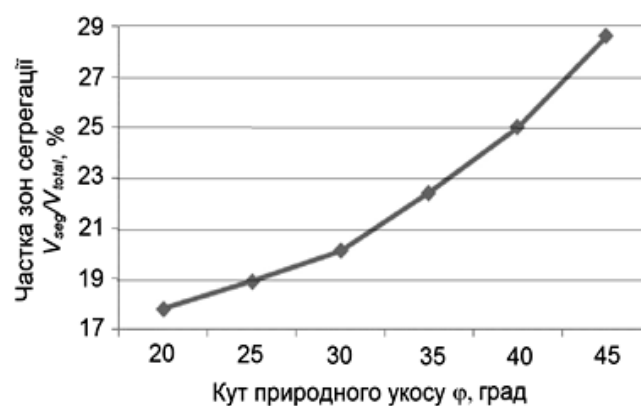


Рис. 1. Залежність частки зон сегрегації V_{seg}/V_{total} від кута природного укосу φ , град

При малих значеннях φ переміщення частинок уздовж поверхні штабеля має обмежений характер, унаслідок чого процес сегрегації проявляється слабше. Натомість при $\varphi > 40^\circ$ формується протяжна зона активного ковзання, у межах якої відбувається інтенсивне диференційоване переміщення фракцій, що супроводжується збільшенням об'єму зон неоднорідності. Отримані результати підтверджують

визначальну роль геометрії схилу штабеля у механізмі сегрегації та узгоджуються з фізичними уявленнями про рух сипких матеріалів уздовж вільної поверхні насипу.

Аналіз результатів параметричного моделювання показав, що швидкість подачі матеріалу конвеєром v істотно впливає на інтенсивність сегрегації, проте характер цього впливу є протилежним дії геометричних факторів. Зі збільшенням швидкості подачі з 0,2 до 0,5 м/с спостерігається зменшення відносної частки об'єму зон сегрегації V_{seg}/V_{total} у середньому на 15–20 % (табл. 2).

Таблиця 2

Вплив технологічних параметрів на частку зон сегрегації

φ , град	h_0 , м	v , м/с	V_{seg}/V_{total} , %
20	2	0,2	17,8
30	3	0,3	20,1
35	4	0,4	22,4
40	5	0,4	25,0
45	6	0,5	28,6

Зазначена закономірність пояснюється скороченням часу перебування частинок у зоні вільного ковзання вздовж схилу штабеля. За підвищених швидкостей подачі матеріал швидше накопичується в зоні укладання, що обмежує можливість диференційованого переміщення частинок за крупністю та знижує інтенсивність просторового розшарування. Таким чином, швидкість конвеєра може розглядатися як ефективний параметр оперативного регулювання процесу штабелювання, який дозволяє впливати на ступінь сегрегації без зміни геометрії штабеля або конструкції обладнання.

Аналіз результатів моделювання показав, що висота скидання матеріалу h_0 чинить помітний вплив на формування зон сегрегації у штабелі. Зі збільшенням висоти скидання з 2 до 6 м відносна частка об'єму зон сегрегації V_{seg}/V_{total} зростає, особливо за великих значень кута природного укосу φ (табл. 3). Така тенденція пов'язана зі зростанням кінетичної енергії частинок у момент контакту зі схилом штабеля, що призводить до розширення зони активного переміщення та збільшення довжини траєкторій їх скочування.

Таблиця 3

Емпіричні коефіцієнти моделі (1)

Матеріал	A	m	n	p	Середнє відхилення, %
Залізородна шихта (тип I)	0,022	1,15	0,73	–0,48	6,3
Залізородна шихта (тип II)	0,019	1,10	0,67	–0,42	7,1

При малих висотах скидання частинки швидко втрачають енергію, а їх переміщення обмежується верхніми шарами штабеля, що зменшує інтенсивність диференційованого розподілу фракцій. Натомість при

$h_0 > 5$ м формується протяжна зона взаємодії частинок різної крупності, у межах якої посилюється розшарування матеріалу та зростає об'єм зон неоднорідності. Це підтверджує доцільність обмеження висоти скидання як одного із ефективних технологічних заходів зниження сегрегації при штабелюванні залізородної шихти.

На основі узагальнення результатів параметричного моделювання побудовано поверхню відгуку $V_{seg} = f(\varphi, h_0, v)$, яка відображає спільний вплив геометричних і кінематичних факторів на формування зон сегрегації у штабелі (рис. 2).

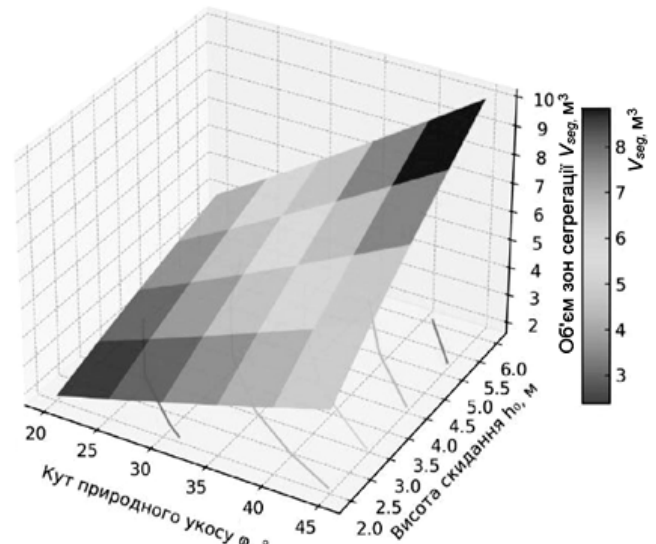


Рис. 2. Поверхня відгуку $V_{seg} = f(\varphi, h_0, v)$

Аналіз поверхні (рис. 2) свідчить на користь того, що найбільший внесок у зміну об'єму зон неоднорідності має кут природного укосу φ , який визначає геометрію схилу та умови ковзання частинок. Висота скидання матеріалу h_0 посилює або послаблює цей ефект залежно від енергетичного стану частинок у момент контакту зі схилом, тоді як швидкість подачі конвеєра v виконує коригувальну роль, зменшуючи інтенсивність сегрегації за рахунок скорочення часу перебування матеріалу в зоні активного переміщення.

Отримані значення коефіцієнтів A , m , n , p підтверджують, що збільшення кута природного укосу φ і висоти скидання матеріалу h_0 призводять до зростання об'єму зон сегрегації, тоді як підвищення швидкості подачі конвеєра v має протилежний, стримуючий ефект. Величина відносного відхилення між розрахунковими та модельними даними не перевищує 7 %, що свідчить про адекватність запропонованої емпіричної моделі (1) та можливість її використання для практичних інженерних розрахунків.

Обговорення результатів. Проведене геометрично-параметричне моделювання підтвердило, що процес формування зон сегрегації у штабелях залізородної шихти визначається не окремими технологічними чинниками, а їх взаємодією в межах єдиної геометрично-кінематичної системи.

Запропонований підхід дозволяє інтерпретувати неоднорідність структури штабеля з позицій механіки руху сипких матеріалів уздовж схилу, а не лише як результат випадкових флуктуацій складу.

Ключову роль у механізмі сегрегації відіграє геометрія схилу штабеля, що визначає характер і протяжність траєкторій ковзання частинок. Зі збільшенням крутизни схилу посилюється диференційоване переміщення фракцій різної крупності, унаслідок чого формується стійке просторове розшарування матеріалу. Така закономірність узгоджується зі сучасними уявленнями про кінетичну сегрегацію сипких середовищ, у межах яких геометричні умови руху є визначальними для інтенсивності розділення частинок.

Висота скидання матеріалу h_0 впливає на процес сегрегації опосередковано — через зміну енергетичного стану частинок у момент контакту зі схилом штабеля. Збільшення висоти падіння призводить до розширення зони активного переміщення та інтенсифікації взаємодії між фракціями, що сприяє формуванню більш виражених зон неоднорідності. Практичний досвід експлуатації агломераційних складів підтверджує доцільність обмеження висоти скидання як одного з ефективних заходів підвищення рівномірності усереднення шихти.

На відміну від геометричних факторів, швидкість подачі матеріалу визначає кінематичний режим формування штабеля. Як показує характер залежності, наведеної на рис. 3, збільшення швидкості подачі зменшує час перебування частинок у зоні вільного ковзання та обмежує можливість їх диференційованого переміщення за розмірами. У цьому контексті швидкість конвеєра може розглядатися як дієвий параметр оперативного регулювання інтенсивності сегрегації без необхідності зміни геометрії штабеля або конструкції обладнання.

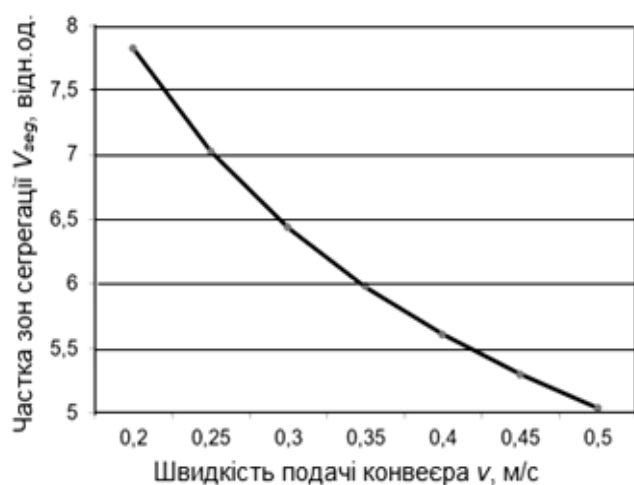


Рис. 3. Вплив швидкості подачі конвеєра (v) на частку зон сегрегації (V_{seg}) при $\varphi = 35^\circ$, $h_0 = 4$ м

Сукупний аналіз впливу геометричних і кінематичних чинників дозволяє розглядати процес штабелювання як керовану систему, параметри

якої можуть бути оптимізовані залежно від вимог до однорідності складу шихти. Запропонована модель забезпечує можливість інженерного прогнозування рівня сегрегації та створює основу для вибору раціональних режимів роботи штабелеукладачів у складі систем підготовки агломераційної сировини. Отримані закономірності узгоджуються із сучасними реологічними підходами до опису течії сипких матеріалів у приповерхневих шарах насипів [19].

Важливою перевагою представленого підходу є його прикладна спрямованість. На відміну від ресурсоемних чисельних методів, геометрично-параметрична модель дозволяє отримувати кількісні оцінки неоднорідності з точністю, достатньою для практичного використання в умовах агломераційних фабрик. Це відкриває можливості інтеграції моделі в алгоритми автоматизованого керування процесом штабелювання та підвищення стабільності агломераційного виробництва в цілому.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення моделі з урахуванням гранулометричного складу, вологості матеріалу та режимів відбору зі штабеля. Побудова комбінованої моделі «штабелювання — змішування» дозволить описати повний цикл усереднення шихти та забезпечити комплексний підхід до керування якістю агломераційної сировини.

Висновки

1. Розроблено геометрично-параметричну модель процесу штабелювання залізорудної шихти, яка дозволяє кількісно оцінювати формування зон сегрегації з урахуванням основних технологічних факторів — кута природного укусу матеріалу, висоти скидання та швидкості подачі конвеєра. Запропонований підхід має інженерну спрямованість і придатний для використання в умовах агломераційних фабрик.

2. Вперше запропоновано узагальнену геометрично-параметричну залежність $V_{seg} = f(\varphi, h_0, v)$, яка поєднує геометрію штабеля та кінематичні умови подачі матеріалу і дозволяє прогнозувати рівень сегрегації в інженерних розрахунках без застосування ресурсоемних чисельних методів моделювання руху частинок.

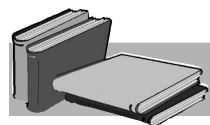
3. Встановлено визначальну роль кута природного укусу матеріалу у формуванні зон сегрегації, що обумовлено особливостями ковзання та диференційованого переміщення частинок уздовж схилу штабеля. Показано, що саме геометрія схилу визначає характер просторової неоднорідності складу шихти.

4. Показано, що висота скидання матеріалу впливає на інтенсивність сегрегації опосередковано — через зміну енергетичного стану частинок і розширення зони їх активного переміщення. Обмеження висоти скидання розглядається як ефективний технологічний захід підвищення рівномірності структури штабеля.

5. Обґрунтовано можливість використання

швидкості подачі матеріалу як регульовального параметра, що дозволяє оперативно знижувати рівень сегрегації за рахунок зміни кінематичного режиму формування штабеля без зміни його геометрії або конструкції обладнання.

6. Визначено раціональні діапазони технологічних параметрів штабелювання, за яких забезпечується мінімальний рівень сегрегації та підвищується стабільність гранулометричного складу шихти перед подачею на агломераційну машину.



REFERENCES

1. Ye, Z., Hilden, M. M., & Yahyaei, M. (2023). A 3D cellular automata ore stockpile model. Part 2: Simulation and industrial validation of dynamic discharging and trajectory segregation mechanisms. *Minerals Engineering*, 200, 108156. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108156>
2. Ye, Z., Hilden, M. M., & Yahyaei, M. (2022). A 3D cellular automata ore stockpile model. Part 1: Simulation of size segregation. *Minerals Engineering*, 187, 107816. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107816>
3. Ye, Z., Yahyaei, M., Hilden, M. M., & Powell, M. S. (2022). A laboratory-scale characterisation test for quantifying the size segregation of stockpiles. *Minerals Engineering*, 188, 107830. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107830>
4. Gray, J. M. N. T., & Thornton, A. R. (2005). A theory for particle size segregation in shallow granular free-surface flows. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 461, 1447-1473. <https://doi.org/10.1098/rspa.2004.1420>
5. Gray, J. M. N. T., & Chugunov, V. A. (2006). Particle-size segregation and diffusive remixing in shallow granular avalanches. *Journal of Fluid Mechanics*, 569, 365-398. <https://doi.org/10.1017/S0022112006002977>
6. Gray, J. M. N. T., & Ancey, C. (2009). Segregation, recirculation and deposition of coarse particles near two-dimensional avalanche fronts. *Journal of Fluid Mechanics*, 629, 387-423. <https://doi.org/10.1017/S0022112009006466>
7. Umbanhowar, P. B., Lueptow, R. M., & Ottino, J. M. (2019). Modeling segregation in granular flows. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 10, 129-153. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060718-030122>
8. Fan, Y., Schlick, C. P., Umbanhowar, P. B., Ottino, J. M., & Lueptow, R. M. (2014). Modeling size segregation of granular materials: the roles of segregation, advection and diffusion. *Journal of Fluid Mechanics*, 741, 252-279. <https://doi.org/10.1017/jfm.2013.680>
9. Thornton, A. R., & Gray, J. M. N. T. (2008). Breaking size segregation waves and particle recirculation in granular avalanches. *Journal of Fluid Mechanics*, 596, 261-284. <https://doi.org/10.1017/S0022112007009445>
10. Zhang, D., Zhou, Z., & Pinson, D. (2017). DEM Simulation of Particle Stratification and Segregation in Stockpile Formation. *EPJ Web of Conferences*, 140, 15018. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714015018>
11. Gómez, R., Skrzypkowski, K., Moncada, M., Castro, R., & Lazo, R. (2022). Segregation Modeling in Stockpile Using Discrete Element Method. *Applied Sciences*, 12(23), 12449. <https://doi.org/10.3390/app122312449>
12. Robinson, G. K. (2004). How much would a blending stockpile reduce variation? *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 74(1), 121-133. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2004.03.010>
13. Gama, E. M., Castro, M. H., Gomes, C., & Gama, F. (2014). Experimental Study of Stockpiles of Iron Ore Fines. *Geomaterials*, 4(1), 18-26. <https://doi.org/10.4236/gm.2014.41003>
14. Young, A. & Rogers, W. P. (2021). Modelling Large Heaped Fill Stockpiles Using FMS Data. *Minerals*, 11(6), 636. <https://doi.org/10.3390/min11060636>
15. Castro, M. H., Luz, J. A. M., & Milhomem, F. O. (2022). Cellular automaton-based simulation of bulk stacking and recovery. *Journal of Materials Research and Technology*, 16, 263-275. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.127>
16. Zhou, G. G. D., Cui, K. F. E., Jing, L., Zhao, T., Song, D., & Huang, Yu. (2020). Particle Size Segregation in Granular Mass Flows With Different Ambient Fluids. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(10), e2020JB019536. <https://doi.org/10.1029/2020JB019536>
17. Qiu, P., & Pabst, T. (2024). Effect of construction method and bench height on particle size segregation during waste rock disposal. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 38(9), 677-700. <https://doi.org/10.1080/17480930.2024.2337504>
18. Gray, J. M. N. T., & Edwards, A. N. (2014). A depth-averaged $\mu(I)$ -rheology for shallow granular free-surface flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 755, 503-534. <https://doi.org/10.1017/jfm.2014.450>
19. Gray, J. M. N. T. (2018). Particle Segregation in Dense Granular Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 50, 407-433. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122316-045201>

Надійшла/Received 11.01.2026

Прийнята/Accepted 13.02.2026

Опублікована/Published 31.03.2026

Summary

R.M. Rudenko, postgraduate student of the Department of Metallurgy named after Professor V.I. Loginov, e-mail: 93rudenko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-6207-0107>

Ye.M. Siharov, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department of Metallurgy named after Professor V.I. Loginov, e-mail: siharovyevgen@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8229-7877>

M.R. Rudenko, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metallurgy named after Professor V.I. Loginov, e-mail: 18rudenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8016-5221>

M.A. Kashcheev, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metallurgy named after Professor V.I. Loginov, e-mail: pmz@pmz.dp.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0938-4384>

O.A. Chubina, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metallurgy named after Professor V.I. Loginov, e-mail: ms.chubina@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2213-5013>

Dniprovsky State Technical University (Kamianske, Ukraine)

Geometric-Parametric Modeling of Segregation Zone Formation during Iron Ore Charge Stacking

The article is devoted to geometric-parametric modeling of the process of segregation zone formation during stacking of iron ore charge in the blending yards of sintering plants. The uneven distribution of particles by size and density in the stack is one of the main causes of fluctuations in the chemical composition of the charge, which negatively affects the stability of the sintering process and the quality of the finished sinter. The aim of the work is to establish an analytical relationship between the technological parameters of stacking and the volume of segregation zones, which determine the degree of homogeneity of the charge composition before it is fed into the sintering machine. To achieve this goal, a method combining geometric analysis and parametric modeling of the movement of charge particles along the free surface of the stack was used, taking into account the angle of natural slope, the height of material discharge, and the conveyor feed rate. Based on an analytical description of particle sliding trajectories, a generalized geometric-parametric relationship linking the volume of segregation zones to the main technological factors of stacking has been proposed. The model coefficients were determined by parametric selection based on the results of modeling corresponding to industrial conditions of agglomeration production. The results obtained made it possible to quantitatively assess the influence of each parameter on the intensity of segregation and to determine rational modes of stack formation. It has been established that a one-sided stacking scheme reduces the length of particle sliding paths and reduces the volume of segregation zones by 1.8-2 times compared to symmetrical stacking. The proposed model can be used for engineering forecasting of the level of charge heterogeneity, optimization of stacking modes, and improvement of the stability of the sintering process without the use of resource-intensive numerical modeling methods.

Keywords

Charge, agglomeration, stacking, segregation, averaging, parametric modeling, trajectory.