

6. Стенцель, Й. І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв [Текст] / Й. І. Стенцель, О. В. Поркунян. – Луганськ: вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля, 2010. – 300 с.
7. Макаров, И. М. Линейные автоматические системы [Текст] / И. М. Макаров, Б. М. Менский. – М.: Машиностроение, 1982. – 504 с.
8. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования [Текст] / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – М.: Наука, 1972. – 768 с.
9. Стенцель Й. І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв [Текст] / Й. І. Стенцель. – К.: ІСДО, 1995. – 360 с.
10. Стенцель, Й. І. Розрахунок перехідних процесів складних систем регулювання методом квадратур [Текст] / Й. І. Стенцель, І. Є. Киричук, О. В. Савельєва // Наук.-техн. збірник «Автоматизація технологічних процесів та промислова екологія». – 1997. – Вип. 1. – С. 2–5.
11. Воронов, А. А. Основы теории автоматического управления. Т. 1 [Текст] / А. А. Воронов. – М.: Энергия, 1980. – 312 с.
12. Фельбаум, А. А. Методы теории автоматического управления [Текст] / А. А. Фельбаум, А. Г. Бутковский. – М.: Наука, 1971. – 743 с.
13. Нетушила, А. В. Теория автоматического управления [Текст] / под ред. А. В. Нетушила. – М.: Высшая шк., 1983. – 488 с.
14. Солодовников, В. В. Частотный метод построения переходных процессов [Текст] / В. В. Солодовников, Ю. И. Толчеев, Г. В. Крутикова. – М.: ГИТТЛ, 1955. – 196 с.
15. Крутов, В. И. Основы теории автоматического регулирования [Текст] / В. И. Крутов, Ф. М. Данилов, П. К. Кузьмик и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 368 с.

Розроблені математичні моделі грудкування шихти у барабанних і тарілчастих грануляторах. Запропоновані системи управління, що використовують у якості керуючих дій кут нахилу та швидкість обертання гранулятора. Представлені результати моделювання, які показують, що застосування систем забезпечить стабілізацію гранулометричного складу шихти і призведе до зниження витрат палива для процесу спікання

Ключові слова: грудкування, шихта, автоматизована система управління, математична модель, балансний метод

Разработаны математические модели окомкования шихты в барабанных и тарельчатых грануляторах. Предложены системы, которые используют в качестве управляющих воздействий угол наклона и скорость вращения гранулятора. Представлены результаты моделирования, которые показывают, что применение систем обеспечит стабилизацию гранулометрического состава шихты и приведёт к снижению расхода топлива для процесса спекания

Ключевые слова: окомкование, шихта, автоматизирована система управления, математическая модель, балансный метод

УДК 622.788.34:519.876.2

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.39035

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ БАРАБАННИМИ І ТАРІЛЧАСТИМИ ГРАНУЛЯТОРАМИ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

В. О. Рахуба

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра автоматизованого управління технологічними процесами
Запорізька державна інженерна академія
пр. Леніна, 226, м Запоріжжя, Україна, 69006
E-mail: victoriya.teacher@gmail.com

1. Вступ

Серед сучасних задач розвитку гірничо-металургійної промисловості України перше місце посідають питання енерго- та ресурсозбереження. Одними з найбільш енергоємних технологій є виробництво агломерату та залізородних окатків. Поряд із цим недосконалість підготовки матеріалу до спікання призводить до виходу великої долі продукту зворотного циклу та коливань продуктивності агломераційних машин. Відомо, що продуктивність агломашини пропорційна газопроникності шару шихтового матеріалу, яка де-

термінується якістю грудкування [1]. Також результат процесу випалу залежить від міцності та фракційного складу сирих окатків. Отже, одними з найважливіших чинників, що впливають на результат процесів спікання та випалу, є гранулометричний склад шихти та міцність гранул. Формування цих характеристик відбувається в ході грудкування сипкої залізородної маси; після чого вони зазнають певних змін під час транспортування і завантаження грудкованої шихти на агломераційні та випалювальні машини. Тому підвищення рівня автоматизованого управління цими процесами забезпечить зниження витрати енергоносі-

ів та підвищення продуктивності процесів агломерації та виробництва окатків.

Для грудкування сипких матеріалів на вітчизняних агломераційних фабриках найбільш поширені грудкувачі барабанного типу, а на фабриках виробництва окатків використовуються тарілчасті гранулятори. Оскільки робота цих агрегатів характеризується наявністю багатьох технологічних зв'язків і піддається значним збуренням, якісне управління ними можливо забезпечити лише у разі застосування автоматизованих систем, функціонуючих на базі математичних моделей, з використанням сучасних технічних засобів. Розробці та моделюванню роботи таких систем присвячене дане дослідження.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Питанню розробки систем управління грануляторами присвячено чимало досліджень, результатом яких було створення декількох основних типів САУ. Їх переважна більшість заснована на регулюванні подання зволожуючої рідини за деякими можливими показниками якості процесу [2]. Відомі також САУ, що стабілізують продуктивність грудкувача [3]. Останніми роками були запропоновані нові способи управління формуванням фракційного складу шихти, одним з яких є забезпечення оптимального співвідношення кількості центрів накопчування та накопчених часток за максимальною порозністю шару сипкого матеріалу [4]. Також запропонована дворівнева САУ, принцип дії якої засновано на використанні кута нахилу та швидкості обертання грудкувача у якості керуючих дій [5].

Описані у [2] системи, які є найбільш поширеними на вітчизняних виробництвах, не можуть забезпечити задовільної якості процесу через наявність чіткого екстремуму залежності міцності агломерату від вмісту вологи у підготовленого до спікання матеріалу, яка є різною для різних шихт [6].

Управління тарілчастими грануляторами, що розглядається у [3], є дещо простішим, адже робота цих агрегатів характеризується видачею монодисперсного матеріалу, і, таким чином, головною задачею автоматизації є стабілізація їх роботи. Проте аналіз експериментальних даних, зокрема представлених у [7], показує, що важливими чинниками впливу на результат процесу слід вважати також швидкість обертання та кут нахилу тарелі.

Запропонований у [4] спосіб управління грудкуванням передбачає корегування гранулометричного складу матеріалу додаванням фракцій руди, однак це матиме вплив також і на хімічний склад матеріалу.

Робота [5] представляє інтерес з точки зору дослідження ефективності використання куту нахилу барабанного грудкувача та швидкості його обертання у якості керуючих дій. Такий спосіб заслуговує більш детального дослідження, оскільки дозволяє вирішити проблеми, пов'язані з впливом на процес за допомогою додавання рідини.

Сучасні технологічні лінії виробництва окатків за кордоном [8, 9] характеризуються комплексністю управління усіх операцій від підготовки шихти до вивантаження кінцевого продукту; якісне грудкування сипких матеріалів забезпечується застосуванням

математичних моделей з використанням у якості керуючих впливів куту нахилу, швидкості обертання гранулятора та додавання добавок, що сприяють склеюванню часток (наприклад, бентоніту). Слід зазначити, що подібні речовини мають високу вартість. Перевага надається тарілчастим грануляторам.

Отже, базу для функціонування ефективної АСУ процесом грануляції має складати адекватний математичний опис. Розглянемо існуючі підходи до моделювання цього процесу.

Перші моделі грудкування були засновані на описі руху окремих часток у грануляторі [10]. Сучасним розвитком такого підходу є використання методу дискретних елементів [11]. Недоліком таких моделей є те, що вони подібні до моделей змішування і не враховують явищ масоперенесення, що складають сутність процесу грудкування.

У роботі [12] пропонується модель, заснована на алгоритмі прогнозу стану системи у кожний наступний момент часу, для розрахунку використовуються дані про фізичні характеристики процесу, керування здійснюється за допомогою зміни швидкості обертання грудкувача та витрати зволожуючої рідини. На основі цих даних складається цільова функція, яка потім мінімізується.

Математичне забезпечення, запропоноване у [4], засноване на апроксимації побічних показників, що розраховуються за експериментальними даними. Такий підхід не забезпечує високої точності опису, також деякі параметри, що входять у модель, складно піддаються вимірюванню.

З розвитком обчислювальної техніки поширилося використання апроксимацій фракційного складу грудкованого матеріалу відомими ймовірнісними розподілами [13]. Такі наближення здійснюються після обробки відеозображення потоку матеріалу. Однак аналіз експериментальних даних, наприклад, [6, 7], демонструє, що гранулометричний склад залізнорудного матеріалу в усьому діапазоні не може бути адекватно представлений за допомогою стандартних функцій розподілу.

У роботі [14] представлена модель роботи дільниці грудкування на основі частотного фільтру; однак даний опис охоплює тільки фабрики, де після грудкувачів шихта потрапляє на спільний конвеєр, що не відповідає умовам вітчизняних виробництв.

Алгоритм САУ, запропонованої у [5], заснований на математичній моделі процесу, що базується на рівняннях матеріального балансу. Таким чином, модель відбиває сутність процесу грануляції – перенесення маси від одних часток до інших. Даними на вході і виході моделі є гранулометричний склад матеріалу, тобто величини, які безпосередньо відіграють головну роль у шихтопідготовці. Проте модель використовує розподіл фракційного складу на три класи крупності, що, звичайно, є неточним представленням процесу. Таким чином, представляє інтерес поширення даного методу для більш детального опису змін гранулометричного складу шихти.

Слід зазначити, що успішне застосування таких моделей можливе лише за умов достатньо точного контролю фракційного складу сипкої маси, що також представляє проблему, особливо для вітчизняних виробництв. Достатня точність вимірювання може бути

досягнута шляхом використання сучасного гранулометра фірми CAMSIZER [15].

$$\begin{cases} 2\Phi_{1\text{загр}} + \Phi_{2\text{загр}} - K_{12} \frac{\Phi_{1\text{загр}} + \Phi_{1\text{ост}}}{2} + K_{21} \frac{\Phi_{2\text{загр}} + \Phi_{2\text{выгр}}}{2} = 100\%; \\ \Phi_{1\text{загр}} + K_{21} \frac{\Phi_{2\text{загр}} + \Phi_{2\text{выгр}}}{2} - K_{12} \frac{\Phi_{1\text{загр}} + \Phi_{1\text{ост}}}{2} = 0; \end{cases} \quad (2)$$

3. Ціль та задачі дослідження

Мета даної роботи полягає у розробці АСУ барабаними і тарілчастими грануляторами, які відповідають сучасним вимогам, та дослідження їх ефективності за допомогою імітаційного моделювання.

Для цього поставлені наступні задачі:

- на основі балансового методу моделювання розробити відповідні моделі;
- розробити структуру та алгоритми систем управління;
- створити імітаційні моделі роботи систем у середовищі Simulink (Matlab) та провести чисельні експерименти дослідження їх ефективності.

4. Розробка математичних моделей процесу грудкування на основі балансового методу та синтез АСУ з їх використанням

4. 1. Моделювання процесу грудкування

Поширюючи метод моделювання, представлений у [5], для п'ятифракційної суміші, отримаємо систему (1):

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{\text{п1}}'' &= \Phi_1' - \left(K_{12} \frac{\Phi_1' + \Phi_1''}{2} + \dots + K_{1n} \frac{\Phi_1' + \Phi_1''}{2} - K_{21} \frac{\Phi_2' + \Phi_2''}{2} - \dots - K_{n1} \frac{\Phi_n' + \Phi_n''}{2} \right) \tau, \\ \Phi_{\text{п1}}'' &= \Phi_2' - \left(K_{21} \frac{\Phi_2' + \Phi_2''}{2} + \dots + K_{2n} \frac{\Phi_2' + \Phi_2''}{2} - K_{12} \frac{\Phi_1' + \Phi_1''}{2} - \dots - K_{n2} \frac{\Phi_n' + \Phi_n''}{2} \right) \tau, \\ \dots\dots\dots \\ \Phi_{\text{п1}}'' &= \Phi_n' - \left(K_{n1} \frac{\Phi_n' + \Phi_n''}{2} + \dots + K_{n,n-1} \frac{\Phi_n' + \Phi_n''}{2} - K_{1n} \frac{\Phi_1' + \Phi_1''}{2} - \dots - K_{n-1,n} \frac{\Phi_{n-1}' + \Phi_{n-1}''}{2} \right) \tau, \\ K_{12}\Phi_1' + \dots + K_{1n}\Phi_1'' &= K_{21}\Phi_2' + \dots + K_{n1}\Phi_n'', \\ K_{21}\Phi_2' + \dots + K_{2n}\Phi_2'' &= K_{12}\Phi_1' + \dots + K_{n2}\Phi_n'', \\ \dots\dots\dots \\ K_{n1}\Phi_n' + \dots + K_{n,n-1}\Phi_n'' &= K_{1n}\Phi_1' + \dots + K_{n-1,n}\Phi_{n-1}'', \end{aligned} \right\} (1)$$

де Φ' – Φ_n' – кількість фракцій кожного класу на вході, %; Φ'' – Φ_n'' – кількість фракцій кожного класу на виході, %; K_{ij} – коефіцієнт масоперенесення від і-ї фракції до j-ї, c^{-1} ; $\tau_{\text{п1}}$ – час грануляції, с.

Оскільки дана система є недовизначеною, то її рішення було отримане за допомогою чисельних методів (Квазі-Ньютона і Лівенберга-Марквардта) і дало можливість прогнозувати фракційний склад шихти у будь-який момент часу. Модель є адекватною при рівні значущості 0,05.

Режим роботи тарілчастого гранулятора відрізняється тим, що на його виході постійно вивантажується фракція кондиційного розміру, а дрібна – лишається у агрегаті. Враховуючи це, для моделювання розділимо процес на дискретні моменти часу, на границі яких будемо складати рівняння матеріального балансу для двофракційної суміші. У сталому режимі завантажується кількість шихти, яка дорівнює вивантаженій. Таким чином, отримаємо систему (2):

де $\Phi_{1\text{загр}}$ – завантажена кількість дрібної фракції, %; $\Phi_{2\text{загр}}$ – завантажена кількість кондиційної фракції, %; $\Phi_{1\text{ост}}$ – кількість дрібної фракції, що залишилася в грануляторі після грудкування попередньої порції шихти, %.

Спростимо (2), виключивши з моделі k_{21} (оскільки $\Phi_{2\text{загр}} < 5\%$, то перенесенням з великої фракції в дрібну можна зневажити).

Після перетворень отримуємо модель процесу, яка має вигляд:

$$2\Phi_{1\text{загр}} + \Phi_{2\text{загр}} - K_{12} \frac{\Phi_{1\text{загр}} + \Phi_{1\text{ост}}}{2} \tau_{\text{гр}} - 100 = 0.$$

За цим виразом можна для різних комбінацій факторів знаходити коефіцієнт масоперенесення k_{12} , від величини якого залежить ефективність роботи гранулятора.

Похибка моделювання складає менше 0,1 %, тому можна вважати, що похибка моделі визначається похибкою засобів вимірювання.

Вживання запропонованого методу моделювання дозволяє побічно оцінювати характеристики міцності фракцій по зміні їх вмісту в шихті.

4. 2. Розробка систем управління на базі отриманих моделей

При розробці системи управління грудкуванням аглошихти важливе значення має вибір критерію якості грудкування і на його основі постановка задачі оптимального управління. Оскільки використаний у цій роботі метод моделювання дозволяє з високою точністю отримати в числовому вигляді функцію розподілу діаметрів частинок багатофракційної суміші, то якість грудкування і збереження структури грудкованої шихти пропонується оцінювати за ступенем близькості функції розподілу діаметрів гранул суміші, що завантажується на агломераційну машину, до оптимального розподілу для даних умов виробництва (який встановлюється експериментально). Задача оптимального управління за таким критерієм може бути вирішена в результаті застосування розробленої АСУ, структурна схема якої показана на рис. 1.

На рис. 1 КОМ – керуюча обчислювальна машина, СУ ПБ – система управління приймальними бункерами, СУ БГ – система управління барабаном-грудкувачем, СУ ПРБ – система управління проміжними бункерами агломашин, ССтВШ – система стабілізації вологості шихти, $H_{\text{ПБ}}$ – рівень заповнення приймального бункера, W – вологість шихти, α – кут нахилу барабана, n – швидкість обертання барабана, $H_{\text{ПРБ}}$ – рівень заповнення проміжного бункера, $\Phi_{\text{ПБі}}$ – фрак-

ційний склад шихти на виході приймального бункера, $Q_{ПБ}$ – продуктивність дозатора приймального бункера, Q – кількість шихти у приймальних бункерах, $\Phi_{БГі}$ – фракційний склад шихти на виході барабана, $\Phi_{ПрБі}$ – фракційний склад шихти на виході проміжного бункера.

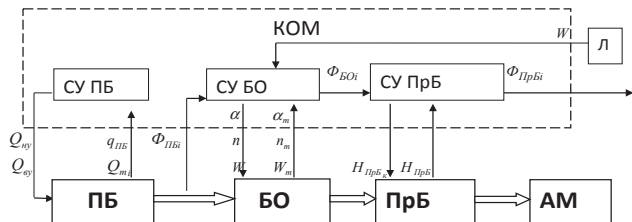


Рис. 1. Структура АСУ формуванням гранулометричних характеристик аглошихти при підготовці до спікання

Для дослідження роботи запропонованої АСУ була створена імітаційна модель системи в середовищі Simulink/Matlab 2007R. У процесі моделювання кількість дрібної фракції формувалася за нормальним законом ($Mx=74,5$; $Dx=4,7$), технологічні величини змінювалися в таких межах: $n=6 \dots 10$; $a=0 \dots 2,5$; $w=8,5 \%$; за відсутності АСУ: $n_0=8$, $a_0=2,5$, $w_0=8,5 \%$, $H=0,5 \dots 1,5$ м.

За допомогою розробленої моделі проведено імітаційне моделювання процесу для умов аглофабрики комбінату «Запоріжсталь», що протікає в відсутності запропонованої АСУ і з її застосуванням.

Метою управління тарілчастим гранулятором є забезпечення виходу якісних окатків при збереженні продуктивності на деякому постійному рівні, який корельований із продуктивністю випалювальної машини. Тобто завданням системи є стабілізація швидкості обертання тарелі, яка забезпечує необхідну міцність окатків на скидання для заданої продуктивності за виходом кондиційної фракції.

Структурна схема системи управління тарілчастим гранулятором представлена на рис. 2.



Рис. 2. Структурна схема АСУ тарілчастим гранулятором

Для дослідження роботи запропонованої системи був створений лабораторний стенд на базі ПЛК VIPA 300. За допомогою FBD-мови розробле-

ний імітатор фракційного складу шихти на вході у грудкувач (на основі експериментальних даних ЦГЗК [7]); значення $F1zagr, F2zagr$, а також X_1-X_4 передаються у КОМ, де вони оброблюються за алгоритмом управління, реалізованим у середовищі Matlab. Для заданих значень алгоритм, заснований на моделі (2) з використанням залежностей коефіцієнту масоперенесення від факторів X_1-X_4 , обчислює оптимальну величину керуючого впливу X_2 . Оперативний контроль і управління реалізуються за допомогою мнемосхеми, створеної у SCADA-системі WinCC, яка через OPC-сервер обмінюється даними з Matlab.

За допомогою розробленого стенду проведено імітаційне моделювання роботи запропонованої АСУ для умов Криворізького ЦГЗК; технологічні величини варіювалися у наступних межах: $F1zagr 90-100 \%$, $X_1 20-60$ т/год; $X_2 8,5-11,5$ об/хв; $X_3 8-9,5 \%$; $X_4 56-60 \%$.

5. Результати моделювання роботи запропонованих систем

Отримані результати дозволяють побачити, як впливає застосування управління за розробленими моделями на зміни фракційного складу матеріалу по тракту шихтоподачі (рис. 3, а, б, рис. 4):

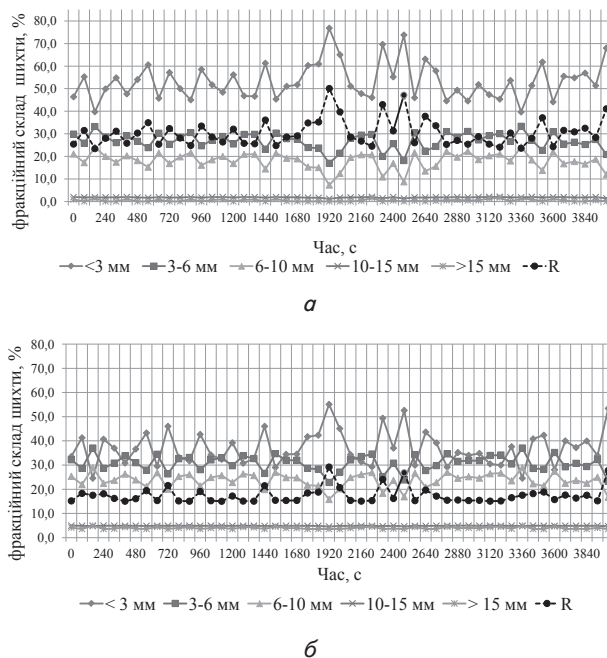


Рис. 3. Імітаційне моделювання коливань фракційного складу шихти, що заван тажується на аглострічку: а – сучасні умови аглофабрики ВАТ «Запоріжсталь»; б – результат роботи запропонованої АСК

Моделювання роботи АСУ тарілчастим гранулятором дозволило отримати залежності, представлені на рис. 5-7.

Представлені результати дозволяють чисельно оцінити вплив керуючих дій на ефективність процесу грудкування.

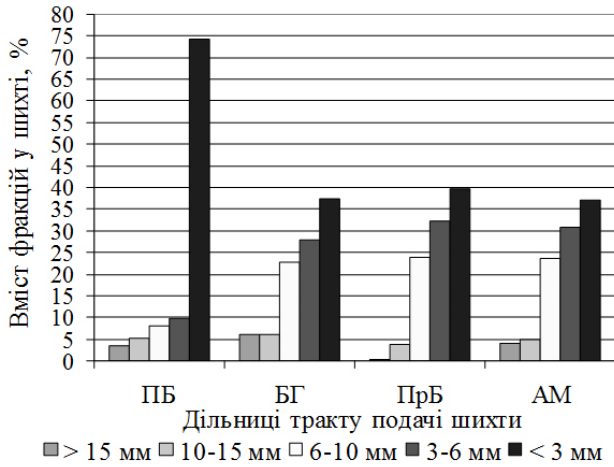


Рис. 4. Гранулометричний склад шихти по тракту шихтоподачі (в результаті застосування запропонованої АСУ)

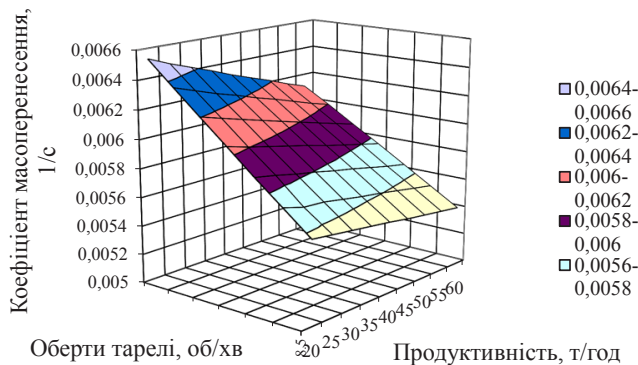


Рис. 5. Вплив продуктивності гранулятора та обертів тарелі на масоперенесення

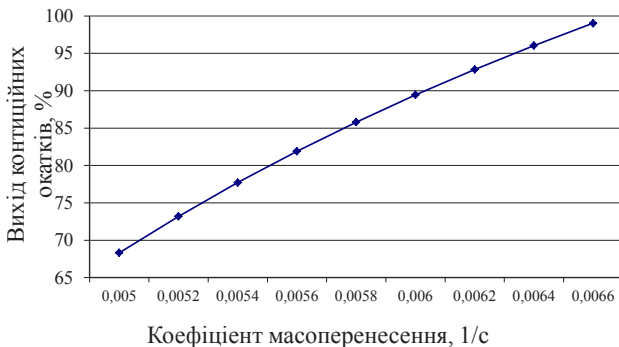


Рис. 6. Вплив коефіцієнту масоперенесення на вихід кондиційних окатків

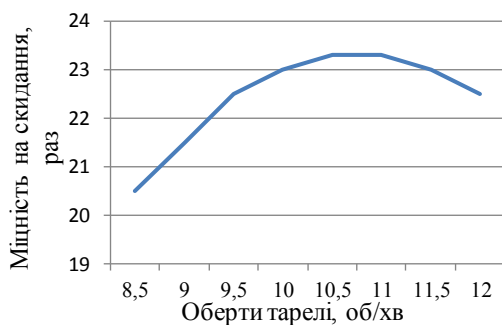


Рис. 7. Вплив швидкості обертання тарелі на міцність окатків

6. Обговорення результатів моделювання роботи систем

Аналіз результатів моделювання АСУ барабаном-грудкувачем показує, що використання розробленої системи дозволяє скоротити різницю між оптимальним і поточним фракційним складом шихти, що завантажується на аглострічку, на 41 % (при зниженні дисперсії цієї величини на 69 %). Це досягається за рахунок зниження кількості дріб'язку на аглострічці на 19 % (при зниженні дисперсії на 24,5 %) і збільшення кількості фракції кондиційного розміру на 10 %. Для даного складу матеріалу були розраховані параметри вертикальної сегрегації шихти в шарі, що спікається. Результати розрахунку показали, що застосування розробленої АСУ забезпечить розподіл палива по висоті шару близький до оптимального, що для умов аглофабрики комбінату «Запоріжсталь» означає зниження вмісту палива в шихті з 4,4 % до 3,8 %. Також на основі статистичних даних цього підприємства можна прогнозувати, що отримане поліпшення структури шару забезпечить зниження виходу дрібної фракції в агломераті на 1,2 %.

Аналіз результатів моделювання АСУ тарілчастим гранулятором демонструє, що екстремум ефективності грудкування досягається при швидкості обертання тарелі 11,5 об/хв, продуктивності 20 т/год (для умов, коли вологість шихти підтримується на рівні 8,5 %, вміст заліза 57 %). Однак при таких значеннях технологічних параметрів зменшується міцність окатків на скидання. В результаті реалізації управління за розробленим алгоритмом визначено, що для умов ЦГЗК оптимальним є режим роботи, коли швидкість обертання тарелі стабілізується на рівні 10,7 об/хв при сталій продуктивності 20 т/год. Однак для більш детальної оцінки ефективності розробленої системи потрібні додаткові чотирифакторні експерименти. Також для розвитку даної АСУ є актуальною розробка інтегрального критерію якості грудкування для розрахунку оптимальних значень керуючих впливів.

Слід зазначити, що застосування запропонованих моделей базується на чисельних методах пошуку значень коефіцієнтів масоперенесення, також для розрахунків використані регресійні залежності, отримані для умов певних підприємств. Тому при використанні запропонованих систем в інших технологічних умовах кількісні показники ефективності можуть відрізнятися.

7. Висновки

Розроблені у даній роботі математичні моделі дозволяють описувати зміни гранулометричного складу полідисперсного сипкого матеріалу при грудкуванні. Застосування запропонованої АСУ барабанним грудкувачем забезпечить покращення фракційного складу шихти, що для умов ВАТ «ЗМК «Запоріжсталь» призведе до зниження вмісту палива в шихті на 0,8 % та скорочення виходу некондиційного агломерату на 1,2 %. Застосування розробленої АСУ тарілчастим гранулятором забезпечить стабілізацію роботи обладнання, яка для умов ЦГЗК при сталій продуктивності

20 т/год досягається при швидкості обертів тарелі 10,7 об/хв. Створені у середовищі Matlab імітаційні моделі систем управління надають можливість спо-

стерігати зміни гранулометричного складу шихти при різних комбінаціях вихідних даних процесу та керуючих дій.

Література

1. Вегман, Е. Ф. Окускование руд и концентратов [Текст] / Е. Ф. Вегман. – М. : Metallurgiya, 1984. – 256 с.
2. Глинков, Г. М. Контроль и автоматизация металлургических процессов [Текст] : учебник для вузов / Г. М. Глинков, А. И. Косырев, Е. К. Шивцов. – М. : Metallurgiya, 1989. – 352 с.
3. Богаенко, И. Н. Разработка и проектирование АСУ ТП фабрик окомкования горно-обогатительных комбинатов [Текст] : уч. пос. / И. Н. Богаенко, И. Ю. Бурляй, Г. Г. Грабовский и др. – К. : НВК «КІА», 2002. – 227 с.
4. Кривенко, С. В. Исследование характеристик барабанного окомкователя как объекта управления [Текст] / О. В. Кривенко // Металлургические процессы и оборудование. – 2011. – № 2 (24). – С. 22–26.
5. Ренгевич, О. В. Современные методы идентификации качественных параметров и механизма окомкования агломерационной шихты [Текст]: сб. науч. тр. / О. В. Ренгевич, Д. А. Крыгин, Ю. С. Клименко // Труды Запорожской государственной инженерной академии. Metallurgiya. – 2004. – № 10. – С. 86.
6. Рахуба, В. О. Разработка и исследование АСУ формированием гранулометрических характеристик аглошихты при подготовке к спеканию [Текст]: сб. науч. тр. / В. О. Рахуба // Труды Запорожской государственной инженерной академии. Metallurgiya. – 2009. – № 20. – С. 110.
7. Богаенко, И. Н. Автоматизация фабрик окускования железных руд и концентратов [Текст] / И. Н. Богаенко, Г. Г. Грабовский, Н. А. Рюмшин и др. – Киев: Техника, 2001. – 290 с.
8. Outotec® Pelletizing technologies [Electronic resource] / Outotec. – Available at: <http://www.outotec.com> – 2001. – Title from the screen.
9. Grate-Kiln™ iron ore pelletizing system [Electronic resource] / Metso. – Available at: [http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/FD649B46389D826E42256B9500317622/\\$File/Great_Kiln.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/FD649B46389D826E42256B9500317622/$File/Great_Kiln.pdf) – 2012. – Title from the screen.
10. Коротич, В. И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов [Текст] / В. И. Коротич. – М. : Metallurgiya, 1986. – 150 с.
11. Bhimji1, D. DEM Batch Granulation Simulations with a rotating drum [Electronic resource] / D. Bhim. C. Thornton, M. Adams. – School of Engineering & Applied Science, Aston University, Birmingham. – Available at: http://www.shef.ac.uk/ptf5/ptf5_posters.pdf – 2003. – Title from the screen.
12. Gatzke, E. Control of a Granulation Process Using a Nonlinear MPC Formulation [Electronic resource] / E. Gatzke, J. Gantt-South Carolina. – University of South Carolina Board of Trustees. – Available at: http://www.engr.sc.edu/dept_progs/chemeng/faculty/gatzke/papers/04-acc-granulation.pdf – 2014. – Title from the screen.
13. Стародумов, А. В. Моделирование гранулометрического состава окатышей, формируемых чашевым окомкователем [Текст] / А. В. Стародумов, И. Д. Степанов // Сталь. – 2003. – № 1. – С. 6–8.
14. Knut Rapp, N. Nonlinear estimation and control in the iron ore pelletizing process [Electronic resource] / N. Knut Rapp. – Available at: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:124359/FULLTEXT01.pdf> – 2004. – Title from the screen.
15. CAMSIZER® Particle analysis with digital image processing [Electronic resource] / Haan: Retsch Technology. – Available at: http://www.retsch-technology.com/brochure_camsizer_en.pdf – 2005. – Title from the screen.