

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 66.047.7:669.295

DOI: 10.34708/GSTOU.2022.35.69.005

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШИХТЫ В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ ТИТАНОВЫХ ОКАТЫШЕЙ С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ

© А. Л. Рутковский, Э. М. Бахтеев, А. М. Макоева, Х. А. Бутов

СКГМИ (ГТУ), Владикавказ, Россия

Рассматривается задача оптимизации и управления газодинамическими показателями шихты. Влажность шихты является главным параметром, и с этим параметром связаны скорость просасывания воздуха, насыпная масса, усадка слоя и скорость перемещения зоны сушки. Методами регрессионного анализа построены математические модели зависимости газопроницаемости слоя шихты, усадки слоя, насыпной массы и скорости перемещения в зоны сушки от её влажности. Находится выражение для оптимальной влажности шихты.

На основе теоретических и экспериментальных данных составлена компьютерная имитационная программа, позволяющая определить оценку оптимальных параметров в производстве получения окатышей.

Математическая обработка экспериментальных результатов позволила получить уравнения регрессии, которые адекватны экспериментальным данным.

Однако при воздействии на процесс неконтролируемых возмущений (гранулометрический состав шихты, её температура, высота слоя шихты) положение экстремума будет смещаться. Для компенсации этих воздействий предлагается оснастить обжиговую машину измерительной вакуум-камерой (ИВК), которая устанавливается на входе машины перед первой рабочей камерой. ИВК оснащается индивидуальным насосом для просасывания воздуха. Разрежение в ИВК стабилизируется системой автоматического регулирования. При этих условиях расход воздуха через ИВК полностью соответствует газопроницаемости слоя шихты. Величина расхода воздуха через ИВК подается на вход экстремального регулятора, управляющего подачей воды в окомкователь. Такая система непрерывно поддерживает максимальную газопроницаемость слоя шихты и наилучшие показатели процесса.

Ключевые слова: газопроницаемость шихты, оптимальная влажность, производство окатышей, математическое моделирование, оптимизация.

Математическое моделирование долгое время имело решающее значение для понимания и прогнозирования явлений в тяжелой промышленности и металлургии [1].

Целью моделирования любого технологического процесса является установление количественной зависимости выходного параметра от одного или группы входных параметров, ко-

торые могут изменяться случайно [2].

Эффективное решение задачи оптимального управления любым сложным объектом, как правило, связано с достаточно полным рассмотрением физической сущности протекающих в нем процессов и анализом их особенностей. При этом первоочередной задачей является построение математической модели объекта

управления, позволяющей осуществить выбор структуры и параметров системы управления, формирование критериев оптимальности и ограничений, решение задач прогнозирования и т. д. [3, 4].

Технология окомкования (производства окатышей) в титановом производстве является одним из основных способов получения кусковых продуктов, который заключается в изготовлении из увлажненных тонкоизмельченных концентратов шариков диаметром 10-25 мм с последующей их сушкой и обжигом при температуре 1250-1350°C, в процессе которого они приобретают высокую механическую прочность, что позволяет, в отличие от агломерата, хранить их неограниченное время и перевозить на любые расстояния.

Получение сырых окатышей включает в себя следующие операции:

- 1 – дозирование компонентов шихты для обеспечения заданного химического состава;
- 2 – перемешивание шихты с целью получения однородной смеси;
- 3 – увлажнение шихты и окатывание ее в гранулы во вращающемся тарельчатом или барабанном окомкователе;
- 4 – выдача сырых окатышей диаметром 10-25 мм и транспортировка их к обжиговым машинам.

Производят два вида окатышей – неофлюсованные и офлюсованные.

В состав шихты при производстве неофлюсованных окатышей входят концентрат, возврат и бентонит; офлюсованных – те же компоненты плюс известняк [5, 6].

Все эти материалы имеют крупность менее 0,074 мм. Содержание фракции 0-0,070 мм в концентрате должно быть не менее 85-90%, а влажность – 9%. В гранулятор также подают некоторое количество крупного возврата (до 0,5 мм), кусочки которого служат зародышами комков. В этом случае предварительное измельчение возврата не требуется [7].

Важным этапом в производстве окатышей является процесс увлажнения шихты (исходного сырья) для достижения её оптимальной газопроницаемости с целью увеличения производительности агломерационных машин и повышения качества готового продукта. Газо-

проницаемость шихты в сильной степени зависит от ее абсолютной влажности. Для материала данного минералогического и гранулометрического состава существует только одно оптимальное значение влажности, которое с возможной степенью точности необходимо поддерживать вручную или автоматически [8, 9].

На практике влажность шихты колеблется в широких пределах из-за, например, изменений давления воды в водопроводе и изменений массы шихты, проходящей через окомкователь в единицу времени. Кроме того, все время меняются минералогический и гранулометрический составы сырья, а вместе с ними и величина оптимальной влажности шихты, соответствующей максимальной газопроницаемости [10].

Газопроницаемость окомкованной агломерационной шихты определяется тремя факторами: гранулометрическим составом исходной шихты, содержанием влаги и режимом окомкования [11].

Содержание влаги оказывает очень сильное влияние на газопроницаемость слоя окомкованной шихты. Результаты исследования Г.И. Волковицкого, Н.М. Якубцинера, Ю.П. Смирнова, Н.З. Плоткина, В.И. Коротича [12] показали, что при изменении влажности существенно меняются свойства окомкованной шихты: насыпная масса, прочность комочков, структура слоя и его газопроницаемость. Типичный характер зависимости этих параметров от влажности шихты показал, что при постепенном увеличении влажности шихты уменьшается ее насыпная масса (увеличивается пористость слоя), растет газопроницаемость. Шихта получает минимальное значение по достижении определенной влажности насыпной массы, с дальнейшим увеличением влажности пористость слоя начинает падать, а газопроницаемость продолжает расти. Такая зависимость характеризуется изменением режима окомкования и соответственно изменением структуры шихты [13, 14]. В дальнейшем, проанализировав результаты, авторы пришли к выводу, что значение оптимальной влажности шихты, при котором получается максимальная вертикальная скорость спекания, примерно на

1 % меньше влажности, соответствующей наибольшей газопроницаемости исходной шихты.

Результаты данного исследования позволяют получить математические модели, с помощью которых можно найти близко к исходной величине оптимальные значения влажности и газодинамических параметров шихты. Построение аппроксимирующих и интерполирующих функций осуществляется применением возможностей программы Mathcad. Для обработки результатов по известным экспериментальным данным были использованы методы регрессии общего вида и полиномиальной регрессии [15, 16, 18]. Окончательно приняты модели, дающие наибольшую точность.

Как правило, регрессия очень эффективна, когда заранее известен (или, по крайней мере, хорошо угадывается) закон распределения данных (x_1, y_1) [17, 19].

Далее приведены результаты, выполненные в системе Mathcad, подготовка исходных данных, регрессия общего вида, полиномиальная регрессия, расчет погрешностей интерполяции и графическая иллюстрация результатов вычислений обработки данных.

На основе экспериментальных и расчетных данных сформированы координаты исходных точек в виде матрицы. Математическая обработка экспериментальных результатов позволила получить приведенные ниже уравне-

ния регрессии, связывающие влажность шихты на скорость просасывания воздуха через слой шихты (1), насыпную массу (2), усадку слоя (3) и скорость перемещения зоны сушки (4).

Экспериментальные данные, которые приведены в работе [12], дают графические выражения взаимосвязи следующих параметров процесса: скорость просасывания воздуха ϑ , насыпная масса d , усадка слоя Δh и скорость перемещения зоны сушки ϑ_1 в зависимости от влажности шихты ω .

В результате обработки экспериментальных данных получено следующее уравнение регрессии:

$$\vartheta(\omega) = 2,493 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{\omega} + 3,877 \cdot 10^{-3} \cdot \omega^3 - 4,066 \cdot 10^{-4} \cdot e^{\omega} \quad (1)$$

где $R=0.99$ – коэффициент корреляции, $F_{расч} = 47.422$, $F_{табл} = 4.876$ – расчетное и табличное значения критерия Фишера для доверительной вероятности $\gamma = 0.95$.

На рис. 1 на основе уравнения (1) приведен график зависимости влажности шихты ω на скорость просасывания воздуха ϑ . Из рис. 1 следует, что полученная модель сходится с экспериментальными данными.

Влияние влажности шихты на насыпную массу аппроксимировано следующим уравнением регрессии (2):

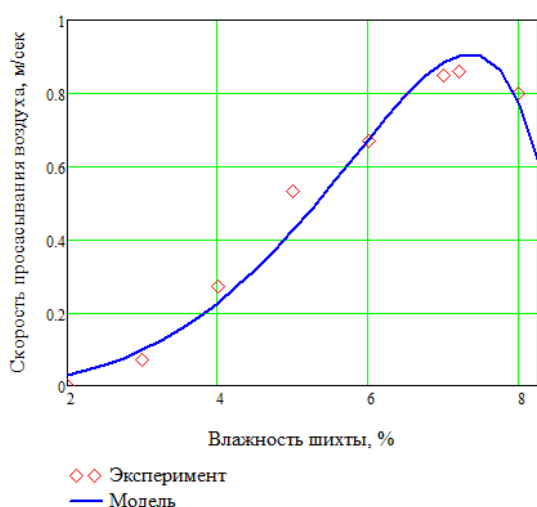


Рис. 1. График влияния влажности агломерационной шихты ω (%) на скорость просасывания воздуха ϑ (м/сек)

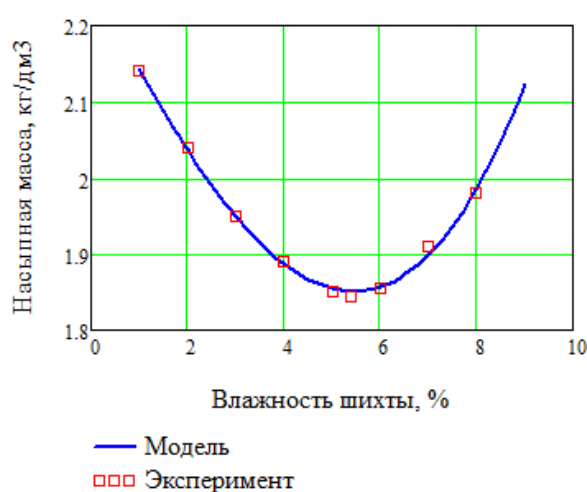


Рис. 2. Влияние влажности агломерационной шихты ω (%) на насыпную массу шихты ϑ (кг/дм³)

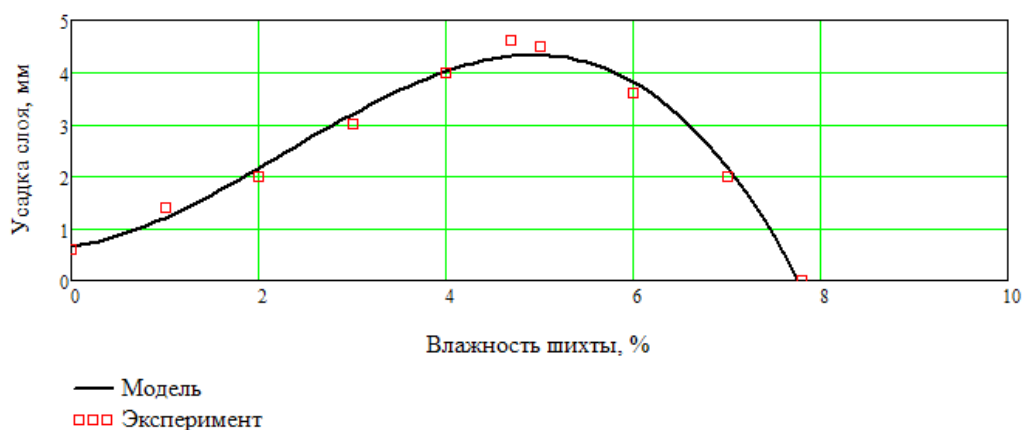


Рис. 3. Влияние влажности агломерационной шихты ω (%) на усадку слоя шихты Δh (мм)

$$d(\omega) = 8.678 \cdot 10^{-4} \cdot \omega^3 + 4.357 \cdot 10^{-3} \cdot \omega^2 - 0.125 \cdot \omega + 2.262 \quad (2)$$

где $R=0.998$ – коэффициент корреляции, $F_{расч} = 322.434$, $F_{табл} = 4.876$ – расчетное и табличное значения критерия Фишера для доверительной вероятности $\gamma = 0.95$.

Результаты расчета приведены на рис. 2.

Влияние влажности шихты на усадку слоя представлено следующим уравнением регрессии (3):

$$\Delta h(\omega) = -0.05 \cdot \omega^3 + 0.348 \cdot \omega^2 + 0.26 \cdot \omega + 0.646 \quad (3)$$

где $R=0.992$ – коэффициент корреляции, $F_{расч} = 61.758$, $F_{табл} = 3.388$ – расчетное и табличное значения критерия Фишера для доверительной вероятности $\gamma = 0.95$.

На рис. 3 на основе уравнения регрессии (3) приведен график зависимости влажности шихты от усадки слоя.

Влияние влажности шихты на скорость перемещения зоны сушки представлено следующим уравнением регрессии (4):

$$\vartheta_1(\omega) = 0.064 \cdot \omega^3 - 2.242 \cdot \omega^2 + 20.386 \cdot \omega - 42.536 \quad (4)$$

где $R=0.995$ – коэффициент корреляции, $F_{расч} = 96.03$, $F_{табл} = 4.876$ – расчетное и табличное значения критерия Фишера для доверительной вероятности $\gamma = 0.95$.

Результаты расчета приведены на рис. 4.

Однако при воздействии на процесс не-

контролируемых возмущений (гранулометрический состав шихты, её температура, высота слоя шихты) положение экстремума будет смещаться. Для компенсации этих воздействий предлагается оснастить обжиговую машину измерительной вакуум-камерой (ИВК), которая устанавливается на входе машины перед первой рабочей камерой. ИВК оснащается индивидуальным насосом для просасывания воздуха (рис. 5).

Разрежение в ИВК стабилизируется системой автоматического регулирования. При этих условиях расход воздуха через ИВК полностью соответствует газопроницаемости слоя шихты. Величина расхода воздуха через ИВК подается на вход экстремального регулятора, управляющего подачей воды в окомкователь. Такая система непрерывно поддерживает максимальную газопроницаемость слоя шихты и наилучшие показатели процесса.

Устройство для регулирования подготовки шихты в производстве титановых окатышей включает гранулятор 1 и обжиговую машину, содержащую зоны подогрева и сушки, зону обжига и зону охлаждения с соответствующими вакуум-камерами, а также индивидуальными вакуумными насосами. Устройство дополнительно снабжено измерительной вакуум-камерой 6, соединенной с индивидуальным вакуумным насосом 7 и установленной на обжиговой машине перед вакуум-камерой 2 зоны сушки. Измерительная вакуум-камера 6 снабжена системой стабилизации разрежения и системой

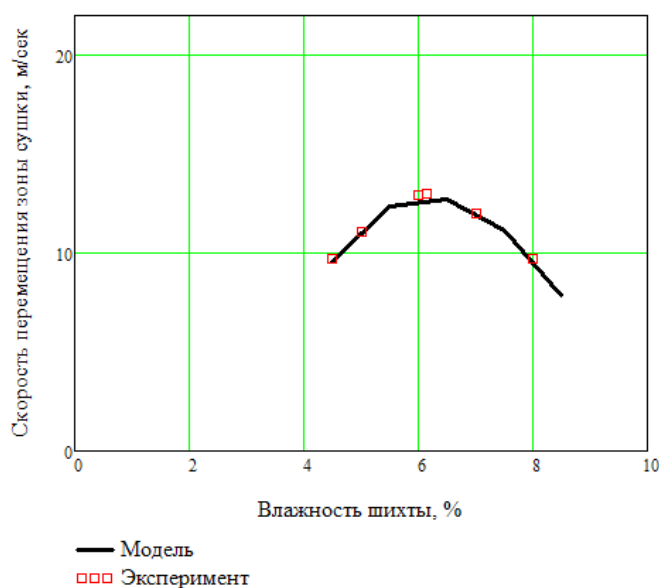


Рис. 4. Влияние влажности агломерационной шихты ω (%) на скорость перемещения зоны сушки v (м/сек).

контроля расхода воздуха. При этом система стабилизации разрежения включает датчик 8 контроля разрежения, исполнительный механизм 9 и заслонку 10, установленную на вакуум-камере 6, а система контроля расхода воздуха включает датчик 11 контроля расхода воздуха и экстремальный регулятор 12, связанный через исполнительный механизм 13 с заслонкой 14 регулирования расхода воды.

Устройство работает следующим образом.

Шихту подают на гранулятор 1, где происходит ее окомкование. Затем сырые окатыши поступают в зону сушки обжиговой машины. С помощью вакуумного насоса 7 воздух просасывают через слой сырых окатышей в измерительную вакуум-камеру 6, в которой разрежение стабилизируют системой стабилизации разрежения. При этом значения разрежения фиксирует датчик 8 контроля разрежения, который, в свою очередь, подает сигнал на исполнительный механизм 9, управляющий заслонкой 10. С помощью изменения положения заслонки 10 система стабилизации разрежения поддерживает его значение в вакуум-камере 6 постоянным. При постоянном разрежении в вакуум-камере 6 расход воздуха через нее зависит от газопроницаемости слоя окатышей. Для управления газопроницаемостью сигнал

с датчика 11 контроля расхода воздуха, проходящего через вакуум-камеру 6, поступает на вход экстремального регулятора 12, который через исполнительный механизм 13 с помощью заслонки 14 регулирует расход воды на вход гранулятора 1. Система контроля расхода воздуха обеспечивает подачу такого количества воды на гранулятор 1, при котором достигается оптимальная газопроницаемость слоя окатышей, определяемого по максимальному расходу воздуха через вакуум-камеру 6 при постоянном разрежении в ней. Окатыши с оптимальной газопроницаемостью после зоны подогрева и сушки движутся по обжиговой машине через зоны обжига и охлаждения, в которых происходит спекание и упрочнение окатышей. Качественный готовый продукт после обжиговой машины выгружается на грохот. Устройство для подготовки шихты в производстве титановых окатышей позволит быстро отрегулировать газопроницаемость слоя даже при изменении состава шихты, что значительно повысит качество окатышей на выходе из обжиговой машины и снизит количество продукта, направляемого в оборот.

Данное устройство позволит упростить управление процессом обжига, повысит качество готового продукта за счет оперативного управления элементами устройства и оптимизации газопроницаемости слоя шихты.

Таким образом, использование экспериментальных данных в сочетании с моделированием позволило получить связь влажности шихты со скоростью просасывания воздуха; зависимости влажности шихты с насыпной массой; усадкой слоя и скоростью перемещения зоны сушки, и найдена корреляция между ними.

В ходе обработки исходных данных средствами функций Mathcad были получены два варианта уравнения регрессии: общего вида и полиномиальная.

Адекватность уравнений регрессий (1) – (4) подтверждена с помощью критерия Фишера.

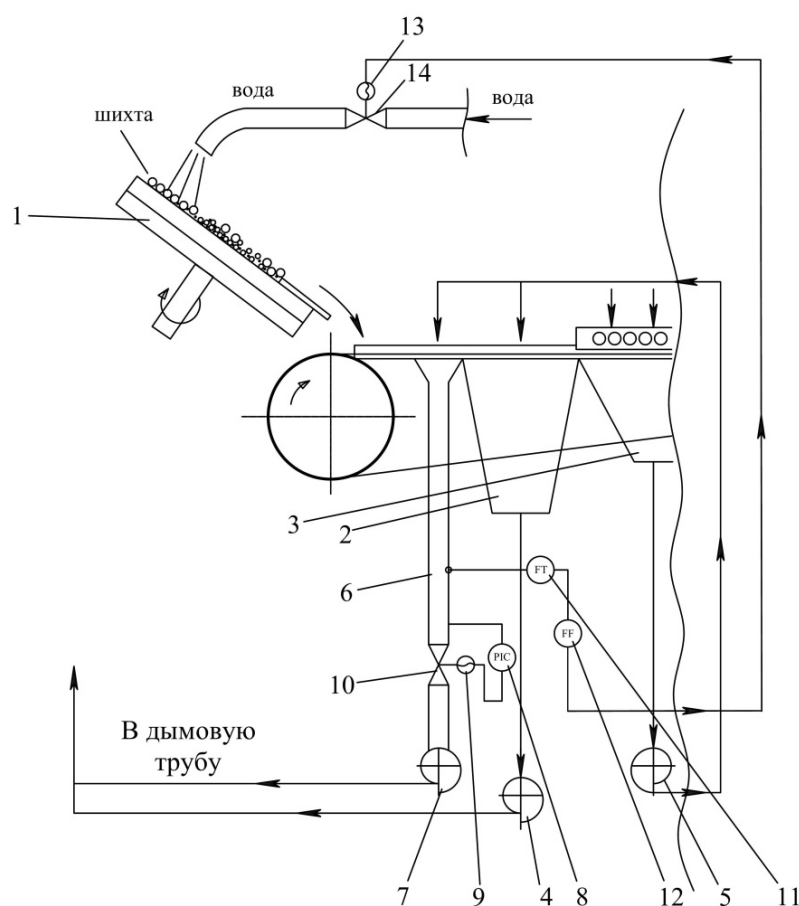


Рис. 5. Фрагмент обжиговой машины с установленной измерительной вакуум-камерой

Высокое значение коэффициента корреляции ($R=0,99$) подтверждает этот результат.

Математическую модель процесса получения окатышей можно использовать для разработки математических моделей многих технологических процессов, проводимых в агломашинах. Для компенсации неуправляемых воздействий предлагается оснастить обжиговую машину измерительной вакуум-камерой (ИВК), которая устанавливается на входе машины перед первой рабочей камерой. ИВК оснащается

индивидуальным насосом для просасывания воздуха. Разрежение в ИВК стабилизируется системой автоматического регулирования. При этих условиях расход воздуха через ИВК полностью соответствует газопроницаемости слоя шихты. Величина расхода воздуха через ИВК подается на вход экстремального регулятора, управляющего подачей воды в окомкователь. Такая система непрерывно поддерживает максимальную газопроницаемость слоя шихты и наилучшие показатели процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Pär Jönsson, Lage Tord, Ingemar Jonsson, Anders Tilliander, Robert Eriksson.* Mathematical Modeling of Metallurgical Processes / Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries // CSIRO, Melbourne, Australia, 10-12 December 2003. Pp. 48-66.
2. *Нурадинов А. С., Уздиева Н. С., Балатханова Э. М., Тенцаев А. Н.* Математическое моделирование процессов формирования литых заготовок при непрерывной разливке стали // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Том XV. №2 (16). 2019. С. 56-66.

3. Арунянц Г.Г., Рутковский А.Л., Алборов Э.К., Сидоров Д.В., Диденко А.А. Оценка и корректировка параметров математических моделей при адаптивном управлении нестационарными технологическими процессами // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. техн. науки. 2004. Спецвыпуск. С. 47-50.
4. Агеев Н.Г. Моделирование процессов и объектов в металлургии: уч. пособие / Н.Г. Агеев. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 108 с.
5. Zhu D. Iron ore palletization / D. Zhu, J. Pan, L. Lu, R. J. Holmes // Iron Ore. 2015. Pp. 435-473.
6. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд: учеб. пособие. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. 345 с.
7. Братковский Е.В. Лабораторный практикум по дисциплине «Экстракция черных металлов из природного и техногенного сырья» для студентов, обучающихся по направлению «Металлургия» / Е.В. Братковский, А.В. Заводяный, А.Е. Пареньков. Орск: «Маркет сервис», 2008. 112 с.
8. Moraes S, Ribeiro T. Iron Ore Pelletizing Process: An Overview, Iron Ores and Iron Oxide Materials. Chapter 3 / S. Moraes, J. Lima, T.R. Ribeiro. London: IntechOpen, 2018. 280 p.
9. Deepak N. An Optimal Route for the Preparation of Metallized Composite Pellets from Ilmenite Concentrate / Nayak Deepak, Ray Nigamananda, Das Nilima, S. RathSwagat, PatiSoobhankar, S., De. Partha // Journal of Sustainable Metallurgy. 2021. № 7. Pp. 1102-1115.
10. Алешин Е.А. Математическая модель зависимости газопроницаемости шихты от ее влажности в процессе производства агломерата // Вестник ЮУрГУ, 2010. № 2. С. 37-40.
11. Коротич В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов / В.И. Коротич. М.: Металлургия, 1966. 251 с.
12. Коротич В.И. Газодинамика агломерационного процесса / В.И. Коротич, В.П. Пузанов. М.: Металлургия, 1969. 208 с.
13. Рутковский А.Л. Оптимизации режима технологического процесса сушки титановых окатышей в агрегате туннельного типа / А.Л. Рутковский, З.Г. Салихов, М.А. Ковалева, Э.М. Бахтеев // Цветные металлы. 2021. № 5. С. 89-94.
14. Komiyama K. M. Numerical analysis of titanium compounds in blast furnace hearth during titania addition / K. M. Komiyama, B.-Y. Guo, H. Zoughbi // Steel Research International. 2014. № 6. Pp. 592-603.
15. Вегман Е.Ф. Теория и технология агломерации / Е.Ф. Вегман. М.: Металлургия, 1974. 208 с.
16. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е.Н. Львовский. М.: Высшая школа, 1988. 239 с.
17. Кирьянов Д.В. Mathcad 14 / Д.В. Кирьянов. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 704 с.
18. Нурадинов А.С. Разработка технологических режимов валковой разливки-прокатки металлических сплавов / А.С. Нурадинов, А.С. Эльдарханов, Ю.И. Кондратьев, И.А. Нурадинов // Сталь. 2021. № 10. С. 8-12.
19. Атаева А.Ю. Применение седиментационного метода с центрифугированием для оценки гранулометрического состава пылевидных материалов на предприятиях Северного Кавказа / А.Ю. Атаева, З.М. Дреев, Г.И. Свердлик, Х.С. Хосаев // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2017. № 3 (7). С. 8-11.

SIMULATION OF THE GAS-DYNAMIC PARAMETERS OF THE CHARGE IN THE PROCESS OF OBTAINING TITANIUM PELLETS FOR THE PURPOSE OF OPTIMIZATION

© A. L. Rutkovsky, E. M. Bakhteev, A. M. Makoeva, H. A. Butov

NCMMI (STU), Vladikavkaz, Russia

The problem of optimization and control of the gas-dynamic parameters of the charge is considered. The moisture content of the charge is the main parameter and the rate of air suction, bulk mass, shrinkage of the layer and the speed of movement of the drying zone are associated with this parameter. Using the methods of regression analysis, mathematical models of the dependence of the gas permeability of the charge layer, the shrinkage of the layer, the bulk mass and the speed of movement to the drying zones on its moisture content are constructed. An expression is found for the optimal moisture content of the charge.

On the basis of theoretical and experimental data, a computer simulation program has been compiled, which makes it possible to determine the assessment of optimal parameters in the production of pellets.

Mathematical processing of the experimental results made it possible to obtain regression equations that are adequate to the experimental data.

However, when the process is affected by uncontrolled perturbations (granulometric composition of the charge, its temperature, the height of the charge layer), the position of the extremum will shift. To compensate for these impacts, it is proposed to equip the roasting machine with a measuring vacuum chamber (MVC), which is installed at the machine inlet in front of the first working chamber. IVK is equipped with an individual pump for sucking air. The vacuum in the IVC is stabilized by an automatic control system. Under these conditions, the air flow through the IVC fully corresponds to the gas permeability of the charge layer. The air flow rate through the IVC is fed to the input of the extreme regulator that controls the water supply to the pelletizer. Such a system continuously maintains the maximum gas permeability of the charge bed and the best process performance.

Keywords: charge gas permeability, optimal moisture content, pellet production, mathematical modeling, optimization.

REFERENCES

1. PärJönsson, Lage TordIngemar, Jonsson, Anders, Tilliander, Robert Eriksson. 'Mathematical Modeling of Metallurgical Processes'. *Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. CSIRO, Melbourne, Australia, 10-12 December 2003. pp. 48-66.
2. Nuradinov, A. S., Uzdieva, N. S., Balatkhanova, E. M. and Tepsaev, A. N. (2019) 'Matematicheskoe modelirovanie protsessov formirovaniya litykh zagotovok pri nepreryvnoi razlivke stali'. *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskie nauki*. [Mathematical modeling of the processes of the formation of cast units in the continuous casting of steel. Herald of GSTOU. Technical sciences]. Volume XV, №2 (16), pp. 56-66.
3. Arunyants, G. G., Rutkovskiy, A. L., Alborov, E. K., Sidorov, D. V. and Didenko, A. A. (2004) 'Otsenka i korrrektirovka parametrov matematicheskikh modelei pri adaptivnom upravlenii nestatsionarnymi tekhnologicheskimi protsessami' *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. Region. Tekhn. Nauki, 2004. Spetsvypusk*. [Estimation and correction of parameters of mathematical models in adaptive control of non-stationary technological processes. Izv. Univer. North Caucasus region. Tech. sciences, Special issue]. P. 47-50.
4. Ageev, N. G. (2016) *Modelirovanie protsessov i ob"ektov v metallurgii: uch. Posobie*. [Modeling of Processes and Objects in Metallurgy]. UrFU, Ekaterinburg 108 p.

5. Zhu, D, Pan, J. Lu, L., Holmes, R. J. (2015) Iron ore palletization. *Iron Ore*. 2015. Pp. 435-473.
6. Pavlovets, V. M. (2014) *Okatyshi v tekhnologii ekstraktsii metallov iz rud: ucheb. posobie. [Pellets in the Technology of Extraction of Metals from Ores]*. SibSIU, Novokuznetsk, 345 p.
7. Bratkovskiy, E. V., Zavodyany, A. V. and Parenkov, A. E. (2008) *Laboratornyi praktikum po distsipline «Ekstraktsiya chernykh metallov iz prirodnogo i tekhnogennoho syr'ya» dlya studentov, obuchayushchikhsya po napravleniyu «Metallurgiya».* [Laboratory workshop on the discipline "Extraction of ferrous metals from natural and technogenic raw materials" for students studying in the direction of "Metallurgy".], «Market service», Orsk, 112 p.
8. Moraes, S., Lima, T. and Ribeiro, JR. (2018) *Iron Ore Pelletizing Process: An Overview, Iron Ores and Iron Oxide Materials. Chapter 3.* IntechOpen, London, 280 p.
9. Deepak, N., Nigamananda, R., Nilima, D., RathSwagat, S., PatiSoobhankar, S. and Partha, De. (2021) 'An Optimal Route for the Preparation of Metallized Composite Pellets from Ilmenite Concentrate'. *Journal of Sustainable Metallurgy*. № 7. Pp. 1102-1115.
10. Aleshin, E. A. (2010) 'Matematicheskaya model' zavisimosti gazopronitsaemosti shikhty ot ee vlazhnosti v protsesse proizvodstva aglomerata'. *Vestnik YuUrGU*. [Mathematical model of a charge gas permeability function from its moisture in the agglomerate production. Bulletin of the South Ural State University]. №2. Pp. 37-40.
11. Korotich, V. I. (1966) *Teoreticheskie osnovy okomkovaniya zhelezorudnykh materialov.* [Theoretical Foundations of Pelletization of Iron Ore Materials]. Metallurgy Publishing House, Moscow 251 p.
12. Korotich, V. I. and Puzanov, V. P. (1969) *Gas dynamics of the sintering process.* Metallurgy Publishing House, Moscow, 208 p.
13. Rutkovskiy, A.L. Salikhov Z.G., Kovaleva M.A. and Bakhteev E.M. (2021) 'Optimizatsii rezhima tekhnologicheskogo protsessa sushki titanovykh okatyshей v agregate tunnel'nogo tipa'. [An optimized process of drying titanium pellets in a tunnel kiln]. *Tsvetnye Metally*. №5. Pp. 89-94.
14. Komiyama, K., Guo, M. and B.-Y. Zoughbi, H. (2014) 'Numerical analysis of titanium compounds in blast furnace hearth during titania addition'. *Steel Research International*. №6. Pp. 592-603.
15. Vegman, E. F. (1974) *Teoriya i tekhnologiya aglomeratsii.* [Theory and Technology of agglomeration]. Metallurgy, Moscow 208 p.
16. Lvovskiy, E. N. (1988) *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul.* [Statistical methods for constructing empirical formulas]. Vysh. shk. Publ., Moscow, 239 p.
17. Kiryanov, D. V. (2007) *Mathcad 14.* Sankt Petersburg. BHV-Petersburg, 704 p.
18. Nuradinov, A. S. Eldarkhanov, A. S., Kondratiev, Yu. I. and Nuradinov, I. A. (2021) 'Razrabotka tekhnologicheskikh rezhimov valkovoy razlivki-prokatki metallicheskih splavov'. *Stal'*. [Development of technological modes of roll casting-rolling of metal alloys. Steel]. №10. Pp. 8-12.
19. Ataeva, A. Yu., Dreev, Z. M., Sverdlik, G. I. and Khosaev, Kh. S. (2017) 'Primenenie sedimentatsionnogo metoda s centrifugirovaniem dlja ocenki granulometricheskogo sostava pyl'evykh materialov na predpriyatiyah Severnogo Kavkaza'. *Groznenskij estestvennonauchnyy byulleten*. [Application of the sedimentation method with centrifugation to assess the granulometric composition of dust-like materials at the enterprises of the North Caucasus. Grozny Natural Science Bulletin]. №3 (7). Pp. 8-11.