

УДК 519.863

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**С. В. Шаповалов¹, В. Г. Лисиенко², Р. П. Ижевский³, Ю. Н. Чесноков⁴,
С. И. Холод⁵, В. В. Рогачев⁶**

^{1,2,4,5,6} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³ Артемовский машиностроительный завод «Вентпром», Артемовский, Россия

⁵ Технический университет УГМК, Верхняя Пышма, Россия

¹ hsi503@yandex.ru

Аннотация. В работе получены статистические показатели, характеризующие оптимальные значения параметров процесса плавки концентрата в печах Ванюкова. Представлены рекомендации для анализа технологического процесса.

Ключевые слова: стохастические параметры, имитационное моделирование, печь Ванюкова, оптимальные характеристики, метод Монте-Карло

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF METALLURGICAL PROCESSES BY THE METHOD OF SIMULATION

**S. V. Shapovalov¹, V. G. Lisienko², R. P. Izhevsky³, Yu. N. Chesnokov⁴,
S. I. Holod⁵, V. V. Rogachev⁶**

^{1,2,4,5,6} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

³ AMZ “Ventprom”, Artyomovsky, Russia

⁵ UMMC Technical University, Verkhnyaya Pyshma, Russia

¹ hsi503@yandex.ru

Abstract. In this work, statistical indicators are obtained that characterize the optimal values of the parameters of the concentrate smelting process in the Vanuykov furnaces. Recommendations for the analysis of the technological process are presented.

Keywords: stochastic parameters, simulation, Vanyukov furnace, optimal characteristics, Monte Carlo method

Сложные и динамично развивающиеся технологические отрасли производства предъявляют повышенные требования к рациональному использованию ресурсов в условиях неопределенности. Металлургические предприятия служат ярким примером неопределенности, связанной со стохастичностью параметров технологического процесса. Для эффективного анализа и управления технологическими процессами целесообразно применять имитационное моделирование методом Монте-Карло [1; 2].

Показателем максимальной эффективности и высокого технического уровня производства является критерий качества (оптимальности) Y , который с математической точки зрения является функцией отклика на набор входных переменных X_n :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n).$$

В качестве уравнения может быть использована любая функциональная зависимость (линейная, логарифмическая, экспоненциальная и др.), полученная различными способами, например в результате активного (или пассивного) эксперимента.

Для оценки выходной переменной Y вводится пороговое значение $Y_{кр}$, т. к. переменная является критерием качества, который разделяет значения выходной переменной на удовлетворяющие заданным требованиям и не удовлетворяющие им.

В условиях неопределенности, характеризующейся стохастичностью процесса, Y можно считать случайной величиной. По этой причине для нахождения оптимальных и устойчивых характеристик процесса требуется его многократное воспроизведение с последующей статистической обработкой полученных данных. При этом функцию отклика можно представлять в процентном выражении, удовлетворяющем критерию качества $Y_{кр}$.

Классические численные методы позволяют приближенно решать подобные задачи путем разбиения пространства на строго определенные участки и заменой действий интегрирования суммированием, дифференцирования методом конечных разностей.

Для поиска оптимальных параметров технологического процесса успешно применяется имитационное моделирование методом Монте-Карло, который позволяет проводить вычислительные операции

с математическими моделями, имитирующими поведение реальных объектов, процессов и систем во времени в течение заданного периода, получить ряд значений функции отклика, реализовать ее распределение. Суть метода достаточно подробно раскрыта в литературе и связана с правилом 3σ , определяющим метод расчета и оценку его погрешности.

Одним из условий применения метода является то, что отклонения случайных величин подчинены нормальному закону распределения с математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением, равными значениям нормативных показателей, используемых в производстве, экономике т. п.

В настоящей работе получены статистические показатели, характеризующие оптимальные значения параметров процесса плавки концентрата в печах Ванюкова с помощью метода Монте-Карло в прикладном пакете MS Excel.

В качестве функции отклика выбрали ожидаемое процентное содержание меди в штейне. Из технологических показателей процесса плавки на штейн взяли процентное содержание влажности в шихте (X_1), процентное содержание меди в шихте (X_2) и процентное содержание кислорода в дутье (X_3), оказывающее наибольшее влияние на содержание меди в штейне.

Из теории и практики плавки в печах Ванюкова известно, что содержание меди в штейне изменяется от 45 % до 60 %. По этой причине за критерий качества, для которого рассчитывается количество сценариев, приняли значение $Y_{кр} \geq 45\%$.

В качестве функциональной зависимости выбрали неполное уравнение линейной регрессии, рассчитанное ранее на основе выборки из массива данных металлургического предприятия:

$$Y = 31,86 + 2,67X_1 + 0,34X_2 - 0,13X_3.$$

Стохастичность параметров характеризуются некоторыми диапазонами, в которых находятся все их значения. Так, влажность шихты изменяется в пределах 1–8 %, содержание меди в шихте — 15–19 % по массе, содержание кислорода в дутье — 40–65 об. %. С помощью метода Монте-Карло генерируется большое количество сценариев входных параметров в указанных диапазонах для оценки оптимального процентного содержания меди в штейне.

Для формирования случайных чисел массивов можно использовать одну из функций *СЛУЧМЕЖДУ* или *Генерация случайных чисел*.

В рассматриваемой методике сформировали в виде табл. 1 три массива псевдослучайных чисел из 100 сценариев для каждого показателя с использованием функции *СЛУЧМЕЖДУ*.

В каждой полученной строке таблицы находятся случайные значения влажности шихты, содержания меди в шихте и содержания кислорода в дутье. На основе полученных данных, по каждой строке рассчитывается содержание меди в штейне, массив значений которых тоже является случайной величиной.

Таблица 1

Фрагмент моделирования сценариев
технологического процесса

| № п/п | Фактор | Влажность шихты | Содержание Cu в шихте | Содержание O ₂ в дутье | Содержание Cu в штейне |
|----------|--------|--------------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| | min | 1 | 15 | 40,0 | — |
| | max | 8 | 19 | 65,0 | — |
| 1 | — | 4 | 19 | 0,8 | 48,896 |
| 2 | — | 8 | 15 | 1,2 | 58,164 |
| 3 | — | 8 | 16 | 1,3 | 58,491 |
| 4 | — | 3 | 16 | 0,5 | 45,245 |
| 5 | — | 7 | 16 | 1,1 | 55,847 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 100 | — | 1 | 16 | 0,2 | 39,944 |

Для быстрого визуального анализа рассчитанных значений применяется гистограмма, которая является доступным, легким для восприятия и мощным аналитическим методом графического представления массива данных.

Гистограмма позволяет оценить статистические показатели случайной величины, функцию ее распределения, выявить закономерности, которые сложно обнаружить с помощью расчетов и трудно описать количественно.

Для определения количества интервалов и их оптимальной длины применяется формула Стерджеса:

$$k = 1 + \log_2 n = 1 + 3,322 \lg n,$$

где k — количества интервалов; n — число наблюдений.

Все показатели расчета на гистограмме выводятся в виде текущих значений массивов данных. При изменении массива псевдослучай-

ных чисел технологических показателей меняется и вид гистограммы (распределение случайной величины по интервалам).

В рассматриваемой задаче для формирования гистограммы выбрали требуемые своим потребностям 6 интервалов шириной 5 % (рис. 1). Как видно из рисунка, в первый интервал попадают значения, меньшие или равные 40 % по содержанию меди в штейне. Во второй — больше 40 %, но меньше или равные 45 % и т. д. Вся площадь гистограммы принимается равной единице, или 100 %.

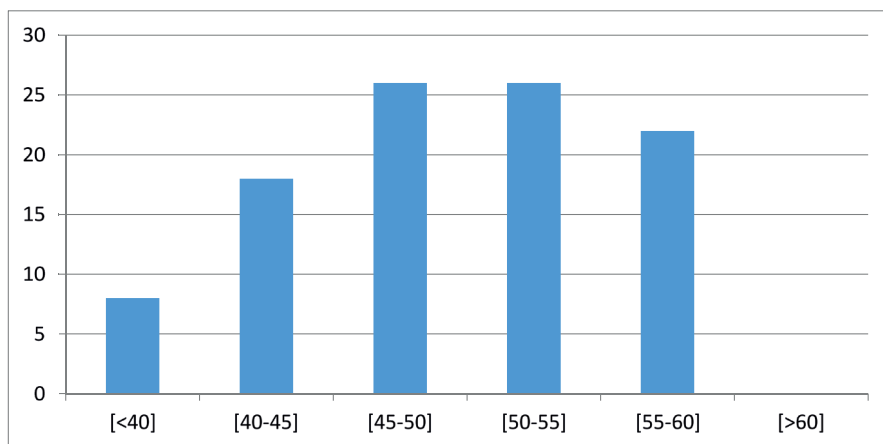


Рис. 1. Гистограмма распределения значений содержания меди в штейне

По виду гистограммы сделаем промежуточную оценку и выводы результатов моделирования. Так, в 8 % сценариев (интервал менее 40 %) процесс плавки вести нецелесообразно. В интервале 40–45 % (18 % сценариев) комбинации исходных данных недостаточно сбалансированы, поэтому для выполнения требований по эффективности процесса получения штейна в печах Ванюкова целесообразно анализировать показатели процесса и использовать известные приемы, улучшающие качество плавки на штейн.

В интервалах от 45 до 60 % сосредоточены оптимальные комбинации исходных данных, обеспечивающие выполнение требований по эффективности технологического процесса. В области, близкой к середине диапазона изменения, природа моделируемого процесса устойчива и содержит наиболее благоприятные сценарии ведения процесса плавки.

Для детальной оценки и качественного анализа содержания меди в штейне выполняется расчет основных статистических показателей моделирования для текущих значений массивов данных с помощью опции *Описательная статистика*, результаты которого выводятся в виде табл. 2. Статистические показатели можно разбить на несколько групп, характеризующие гистограмму: показатели формы, показатели расположения, показатели разброса.

Таблица 2

Техничко-статистический анализ моделирования

| Статистические показатели | Значения показателей | Округленные значения |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|
| Среднее | 50,0087 | 50 |
| Стандартная ошибка | 0,603731485 | 0,6 |
| Медиана | 50,873 | 50,9 |
| Мода | 42,941 | 42,9 |
| Стандартное отклонение | 6,03731485 | 6 |
| Дисперсия выборки | 36,4491706 | 36,4 |
| Эксцесс | -1,161093563 | -1,16 |
| Асимметричность | -0,115483744 | -0,12 |
| Интервал | 19,881 | 19,9 |
| Минимум | 39,604 | 39,6 |
| Максимум | 59,485 | 59,5 |
| Сумма | 5000,869 | 5000,9 |
| Счет-количество значений выборки | 100 | 100 |
| Наибольший (1) | 59,485 | 59,5 |
| Наименьший (1) | 39,604 | 39,6 |
| Уровень надежности (95,0%) | 1,197934247 | 1,2 |

Безусловно, все статистические показатели важны для принятия управленческих решений. Рассмотрим лишь интерпретацию показателей расположения и разброса, усилив предварительные выводы. К показателям расположения относятся среднее значение, медиана, мода, интервал.

Среднее или выборочное среднее (значение 50) является несмещенной и эффективной оценкой математического ожидания случайной величины Y и дает общее представление о нахождении центра выборки из 100 различных, но однородных значений моделирования.

Медиана делит выборку на две равные части и показывает, что половина полученных значений находится слева от значения 50, что больше критического уровня ($Y_{кр} \geq 45\%$).

Мода (значение 42,9) характеризует наиболее частое встречающееся значение содержания меди в штейне в выборке.

Показатели разброса характеризуют отклонение точек выборки относительно среднего значения.

Стандартное отклонение (значение 0,6), как и дисперсия (значение 36,4), — это мера разброса данных вокруг среднего; свидетельствуют о том, что большая часть результатов располагается в пределах 6 единиц от среднего, т. е. между значениями 44 и 56, что в процентном отношении составляет 47 % от всех значений содержания меди в штейне. Очевидно, что чем меньше дисперсия и стандартное отклонение, тем устойчивее технологический процесс.

По данным моделирования и оценки статистических показателей целесообразно выбирать оптимальные комбинации исходных данных процесса плавки концентрата в печах Ванюкова [3; 4], которые сосредоточены в интервалах от 45 до 60 % и соответствуют выполнению требований по эффективности технологического процесса и ресурсосбережения [5].

Мероприятия по управлению технологическим процессом сводятся к тому, чтобы снизить коэффициент стандартного отклонения известными приемами, улучшающими качество плавки [6].

Таким образом, метод Монте-Карло позволяет при расчете каждого сценария изменять одновременно значения всех факторных показателей, определять их оптимальное сочетание, соответствующее выбранному критерию качества, в целях принятия решения о прогнозировании и проведении процесса в условиях экономии энергоресурсов. Такую методику можно использовать для описания неопределенности различных технологических процессов, изменяя исходное содержание массива величин и диапазон их вариации, а также вводя новые.

Список источников

1. Агеев Н. Г. Моделирование процессов и объектов в металлургии. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. 108 с.
2. Ермаков С. М., Михайлов Г. А. Курс статистического моделирования. М. : Наука, 1976. 320 с.

3. Автогенные процессы в цветной металлургии / В. В. Мечев [и др.]. М. : Металлургия, 1991. 413 с.
4. Кривандин В. А. Теплотехника металлургического производства. Т. 2. Конструкция и работа печей / под ред. В. А. Кривандина. М. : МИСиС, 2001. 736 с.
5. Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М., Ладыгичев М. Г. Хрестоматия энергосбережения / под ред. В. Г. Лисиенко. М. : Теплотехник, 2005.
6. ИТС 3–2019. Производство меди [Электронный ресурс] : информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. М. : Бюро НДТ, 2019. 314 с. URL: <https://www.rst.gov.ru/documentManager/rest/file/load/1577265175246> (дата обращения: 10.12.2020).