

ПРОЦЕДУРА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ВЕЛЬЦ-ПРОЦЕССОВ

Л.С. Казаринов, А.Р. Вернергольд, О.В. Колесникова

Рассмотрен общий вид экстремальных характеристик режимов вельц-печи. Дан метод идентификации указанных характеристик по статистическим данным эксплуатации. На основе построенных характеристик предложена процедура оптимизации режима вельц-процесса, состоящая в удержании дутья на траектории крутого восхождения, движении по траектории крутого восхождения и реверсе движения в случае снижения эффективности вельц-процесса. Предложенная процедура позволит достичь максимальной производительности вельц-печи при минимизации затрат.

Ключевые слова: вельц-процесс, вельц-печь, оптимизация.

Введение

Крупнейшим производителем цинка в Российской Федерации является ОАО «Челябинский цинковый завод» (ОАО «ЧЦЗ»). ОАО «ЧЦЗ» работает по классической гидрометаллургической схеме: обжиг цинковых концентратов, выщелачивание огарка с очисткой растворов и электролитическое осаждение цинка с последующим переплавом катодов. Первой стадией указанной схемы производства цинка является обжиг цинковых концентратов и некондиционных вторичных видов сырья (коллективные концентраты, окисленная руда, кеки, шламы и др.). Самой эффективной технологией утилизации цинкосодержащего вторичного сырья является вельц-процесс.

Вельц-процесс применяется для переработки материалов с низким содержанием летучих металлов путем нагревания их во вращающейся трубчатой печи до температуры, при которой увлекаемый металл возгоняется. Возогнанный металл увлекается газами, образующимися в печи, и улавливается в виде пыли.

Ведущей научной организацией в РФ по исследованию и практическому внедрению технологии вельц-процессов в цинковом производстве является инженерный центр ОАО «ЧЦЗ». Процесс вельцевания цинковых кеков рассмотрен в работах [1–14].

В настоящей работе рассматривается решение оперативной задачи оптимизации режимов вельц-печи на основе построения экстремальных характеристик.

1. Автоматизация режимовми вельц-печи

В настоящее время, как правило, вельц-процесс является автоматизированным. На рис. 1 в качестве примера приведена экранная форма диспетчера АСУ ТП вельц-печи № 5 ОАО «ЧЦЗ».

Автоматизация позволяет осуществлять контроль и управление параметрами технологического процесса, а также сбор и хранение значений параметров. Данные эксплуатации можно обрабатывать статистическими методами с целью выявления зависимостей технологических параметров, позволяющих улучшить качество режимов вельц-процесса.

2. Общий вид экстремальных характеристик вельц-печи

На рис. 2 приведен общий вид экстремальных характеристик вельц-печи. Характеристики представляют собой зависимости выработки вельц-оксида от объема дутья и расхода коксовой мелочи. Дутье используется для интенсификации процессов горения углерода (коксовой мелочи) и окисления паров цинка, а также поддержания необходимой температуры в реакционной зоне печи.

На рис. 2 приняты следующие обозначения: W_o – выработка вельц-оксида; W_o^{\max} – максимально возможная выработка вельц-оксида; V_k – расход коксовой мелочи; O_2 – объем дутья; $L_{кр}$ – траектория крутого восхождения.

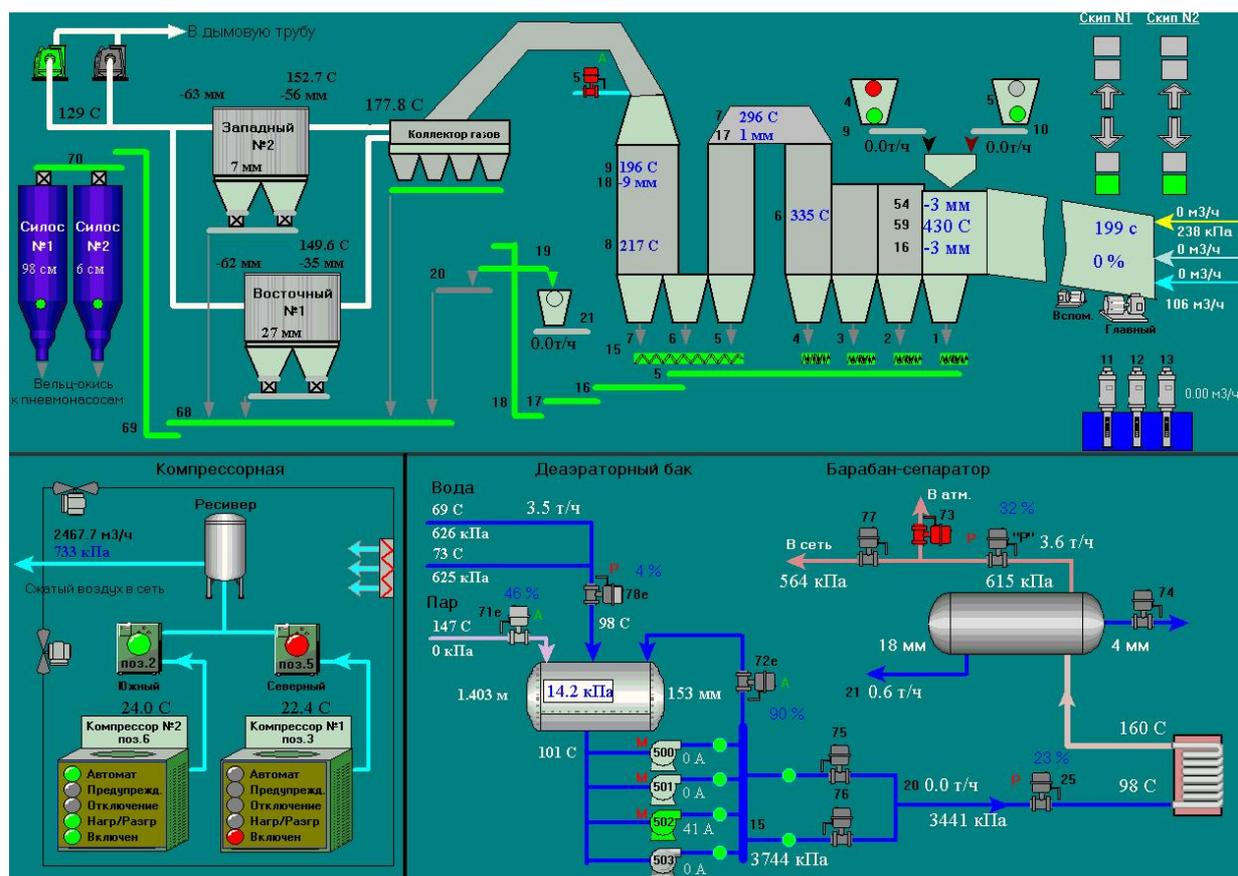


Рис. 1. Экранная форма диспетчера АСУ ТП вельц-печи № 5 ОАО «ЧЦЗ»

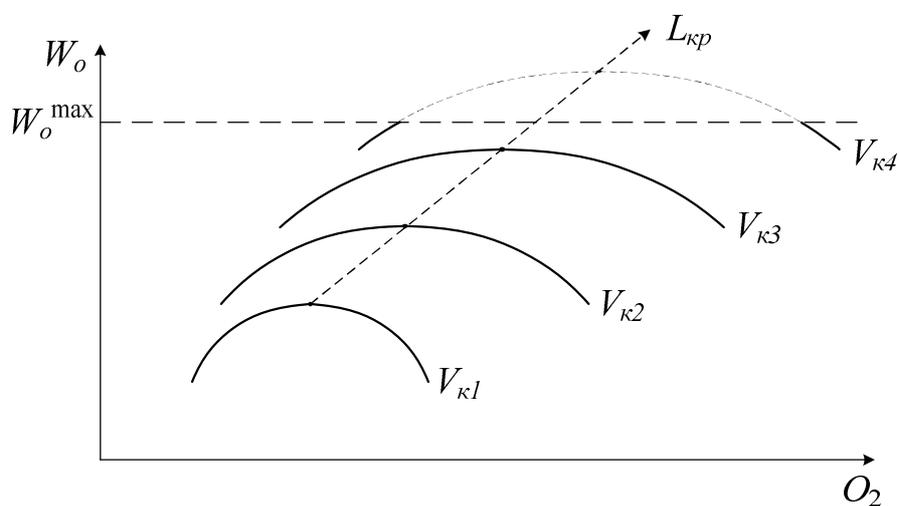


Рис. 2. Общий вид экстремальных характеристик вельц-печи

Экстремум указанной зависимости достигается при оптимальном соотношении дутья и коксовой мелочи. Так, при недостатке дутья наблюдается неполное выгорание коксовой мелочи и уменьшение выработки тепловой энергии, что снижает энергетическую эффективность печи. При избыточной подаче дутья тепло выдувается из печи, что также снижает ее эффективность.

Пропорциональное увеличение подачи дутья и коксовой мелочи в соответствии с линией крутого восхождения ($L_{кр}$) приводит к росту выработки вельц-оксида. Однако рост возможен до определенного уровня (W_o^{max}), определяемого составом загружаемой шихты и производительностью печи. Дальнейшее увеличение подачи дутья и коксовой мелочи является нецелесообразным, так как приводит к нерациональному использованию ресурсов.

3. Идентификация экстремальных характеристик

Аналитическая форма записи зависимости объема производимой вельц-окси от объема подаваемого дутья и расхода коксовой мелочи, представленной на рис. 2, имеет вид:

$$W_o = a_0 + a_1 V_k - a_2 (O_2 - (a_3 + a_4 V_k))^2, \quad (1)$$

где a_i ($i \in [0, 4]$) – искомые структурные параметры зависимости.

Для нахождения параметров a_i можно применить метод Ньютона решения нелинейных уравнений, который заключается в следующем. Предположим, что известно начальное приближение вектора параметров $\mathbf{a} = \mathbf{a}_0$. Тогда в окрестности точки \mathbf{a}_0 соотношение (1) можно разложить в линейный ряд [7]:

$$y = \mathbf{W}_o[\mathbf{a}](\mathbf{x}) \approx \mathbf{W}_o[\mathbf{a}_0](\mathbf{x}) + \sum_{i=0}^4 \Delta a_i g_i(\mathbf{x}), \quad (2)$$

где $\mathbf{x} = (O_2, V_k)$ – вектор переменных; \mathbf{a} – вектор структурных параметров нелинейного уравнения (1); $\Delta a_i = a_i - a_{i0}$ – искомые коэффициенты зависимости (2); g_i – частные производные по параметрам a_i .

Частные производные определяются по формулам:

$$g_0 = \frac{\partial W_o}{\partial a_0} = 1; \quad (3)$$

$$g_1 = \frac{\partial W_o}{\partial a_1} = V_k; \quad (4)$$

$$g_2 = \frac{\partial W_o}{\partial a_2} = -(O_2 - (a_3 + a_4 V_k))^2; \quad (5)$$

$$g_3 = \frac{\partial W_o}{\partial a_3} = 2a_2 (O_2 - (a_3 + a_4 V_k)); \quad (6)$$

$$g_4 = \frac{\partial W_o}{\partial a_4} = 2a_2 V_k (O_2 - (a_3 + a_4 V_k)). \quad (7)$$

Значения коэффициентов Δa_i линейной зависимости (2) на совокупности статистических данных эксплуатации можно определить, например, методом наименьших квадратов. Зная значения Δa_i , можно уточнить искомые значения структурных параметров зависимости (1)

$$a_{i,1} = a_{i,0} + \Delta a_i, \quad i \in [0, 4]. \quad (8)$$

Далее, рассматривая вектор параметров \mathbf{a}_1 как начальное приближение для следующего шага решения, повторим процедуру решения задачи. В результате будет получено следующее приближение решения \mathbf{a}_2 . Рекуррентно повторяя указанную процедуру решения, получим последовательность решений

$$\mathbf{a}_0, \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots \quad (9)$$

Если последовательность (9) сходится:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|\mathbf{a}_k - \mathbf{a}_{k-1}\| = 0, \quad (10)$$

то она сходится к искомому решению.

Таким образом, можно построить экстремальные характеристики вельц-процесса на множестве экспериментальных данных по выработке вельц-окси, объему дутья и расходу коксовой мелочи.

4. Процедура оптимизации режима вельц-процесса

На основе построенных экстремальных характеристик оператору вельц-печи ставится задача оптимизации режима вельц-процесса. Процедура оптимизации режима вельц-процесса заключается в следующем.

1. Удержание дутья на траектории крутого восхождения:

– увеличить подачу дутья в случае, если

$$\frac{\partial W_o}{\partial O_2} > 0; \quad (11)$$

– уменьшить подачу дутья в случае, если

$$\frac{\partial W_o}{\partial O_2} < 0. \quad (12)$$

2. Движение по траектории крутого восхождения: увеличить подачу дутья и расход коксовой мелочи, если

$$\frac{\partial W_o}{\partial O_2} = 0; \quad \frac{\partial W_o}{\partial L_{кр}} > 0. \quad (13)$$

3. Реверс движения по траектории крутого восхождения: уменьшить подачу дутья и расход коксовой мелочи, если

$$\frac{\partial W_o}{\partial O_2} = 0; \quad \frac{\partial W_o}{\partial L_{кр}} = 0; \quad \frac{\partial E_{кр}}{\partial L_{кр}} < 0, \quad (14)$$

где $E_{кр}$ – эффективность вельц-процесса, определяемая по соотношению

$$E_{кр} = \frac{W_o}{V_k}. \quad (15)$$

Заключение

При автоматизации управления вельц-процессом наряду с задачами контроля и стабилизации режимных параметров целесообразно решать оперативную задачу оптимизации режимов. В работе предлагается процедура оптимизации с использованием экстремальных характеристик, представляющих собой зависимость выработки вельц-оксида от объема дутья и расхода коксовой мелочи. Рассмотрен алгоритм идентификации указанных характеристик по статистическим данным эксплуатации. Предложенная процедура оптимизации позволит достичь максимальной производительности вельц-печи при минимизации затрат.

Литература

1. Абдеев, М.А. Вельцевание цинк-свинцовсодержащих материалов / М.А. Абдеев, А.В. Колесников, Н.Н. Ушаков. – М.: Металлургия, 1985. – 120 с.
2. Об оптимальном управлении процессом вельцевания цинковых кеков / А.Р. Вернергольд, Л.С. Казаринов, О.В. Колесникова, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2008. – Вып. 7, № 3 (103). – С. 54–56.
3. Вернергольд, А.Р. Лингвистический подход к оптимизации управления вельц-процессом / А.Р. Вернергольд, Л.С. Казаринов, О.В. Колесникова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2008. – Вып. 8, № 17 (117). – С. 61–65.
4. Вернергольд, А.Р. Энергоэффективное управление вельц-процессом / А.Р. Вернергольд, Л.С. Казаринов, О.В. Колесникова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2010. – № 22 (198). – С. 75–78.
5. Давидсон, А.М. К вопросу расчета теплообмена в трубчатых вращающихся печах / А.М. Давидсон, А.Л. Рутковский // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 1999. – № 3. – С. 65–67.
6. Исследование тепломассопереноса по основным зонам вельц-печи / Н.П. Динцис, А.М. Давидсон, Г.А. Епутаев, Н.В. Ходов // Цветная металлургия. – 1977. – № 2. – С. 98–101.
7. Казаринов, Л.С. Системные исследования и управление (когнитивный подход): науч.-метод. пособие / Л.С. Казаринов. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ: Издатель Т. Лурье, 2011. – 524 с.
8. Казаринов, Л.С. Автоматизированное управление эффективностью вельц-процессов на основе оптимальной коррекции параметров технологических режимов / Л.С. Казаринов, А.Р. Вернергольд, О.В. Колесникова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2010. – Вып. 11, № 2 (178). – С. 73–78.
9. Казаринов, Л.С. Система автоматизированного управления эффективностью вельц-процессов / Л.С. Казаринов, А.Р. Вернергольд, О.В. Колесникова // Интеграция науки и производства. – 2010. – № 5. – С. 60–61.
10. Козлов, П.А. Вельц-процесс / П.А. Козлов. – М.: Издат. дом «Руда и металлы», 2002. – 176 с.

11. Лисиенко, В.Г. *Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: справ. издание: в 2 кн.* / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисенко. – М.: Теплотехник, 2004. – 588 с.

12. Рутковский, А.Л. *Моделирование процесса плавления шихты в вельц-печи* / А.Л. Рутковский, А.А. Саакянц, Т.В. Старикова // *Известия вузов. Цветная металлургия.* – 2005. – №1. – С. 66–68.

13. Ходов, Н.В. *Разработка и исследование способа вельцевания с циркуляцией коксика клинкера в системе «газовый поток – шихта»: автореф. дис. ... канд. техн. наук* / Н.В. Ходов. – Орджоникидзе, Сев.-Кавказ. горно-металлург. ин-т., 1974. – 30 с.

14. Ходов, Н.В. *Математическое описание работы вельц-печи, как объекта с распределенными параметрами* / Н.В. Ходов, Г.А. Епугаев, А.М. Давидсон // *Труды Северо-Кавказского горно-металлургического института.* – 1973. – Вып. XXXIII. – С. 17–19.

Казаринов Лев Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой автоматике и управления, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); kazarinov@ait.susu.ac.ru.

Вернергольд Александр Рудольфович, главный энергетик, ОАО «Челябинский цинковый завод» (г. Челябинск); arv@zinc.ru.

Колесникова Ольга Валерьевна, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматике и управления, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); olgavpopova@rambler.ru.

Поступила в редакцию 12 сентября 2014 г.

Bulletin of the South Ural State University
Series “Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics”
2014, vol. 14, no. 4, pp. 143–148

THE OPTIMIZATION PROCEDURE OF ROTARY-KILN OPERATIONS

L.S. Kazarinov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
kazarinov@ait.susu.ac.ru,

A.R. Vernergold, JSC “Chelyabinsk Zinc Plant”, Chelyabinsk, Russian Federation,
arv@zinc.ru,

O.V. Kolesnikova, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
olgavpopova@rambler.ru

Rotary-kiln extremum characteristics are considered. Identification method of rotary-kiln extremum characteristics by using statistical data is proposed. Optimization procedure of rotary-kiln operations is proposed. The optimization procedure includes: retention of blowing on the trajectory of high-production gradient, motion along the trajectory and reverse motion in case of rotary-kiln efficiency decrease. The procedure contributes to high rotary-kiln productivity and cost minimization.

Keywords: rotary-kiln operations, optimization

References

1. M.A. Abdeev, A.V. Kolesnikov, N.N. Ushakov. *Vel'tsevanie tsink-svinetssoederzhaschikh materialov* [Processing of Zinc and Lead-Bearing Materials]. Moscow, Metallurgy Publ., 1985. 120 p.

2. Vernergold A.R., Kazarinov L.S., Kolesnikova O.V., Shnayder D.A. [The Optimal Control of Rotary-Kiln Process]. *The Bulletin of South Ural State University. Ser. Computer Technology, Control, Electronics*, 2008, vol. 7, no. 3 (103), pp. 54–56. (in Russ.)

3. Vernergold A.R., Kazarinov L.S., Kolesnikova O.V. [Linguistic Approach to Optimization of

Rotary-Kiln Process Control]. *The Bulletin of South Ural State University. Ser. Computer Technology, Control, Electronics*, 2008, vol. 8, no. 17 (117), pp. 61–65. (in Russ.)

4. Vernergold A.R., Kazarinov L.S., Kolesnikova O.V. [Energy Efficient Control of Rotary-Kiln Process]. *The Bulletin of South Ural State University. Ser. Computer Technology, Control, Electronics*, 2010, no. 22 (198), pp. 75–78. (in Russ.)

5. Davidson A.M., Rutkovskiy A.L. [On the Question of Calculating Heat Transfer in Tube Rotary-Kilns]. *The Bulletin of Universities: Non-Ferrous Metallurgy*, 1999, no. 3, pp. 65–67. (in Russ.)

6. Dintsis N.P., Davidson A.M., Eputaev G.A., Hodov N.V. [Research of Heat-and-Mass Transfer in the Main Zones of Rotary-Kiln]. *Nonferrous Metallurgy*, 1977, no. 2, pp. 98–101. (in Russ.)

7. Kazarinov L.S. *Sistemnye issledovaniya i upravlenie (kognitivnyy podhod): nauchno-metodicheskoe posobie* [System Studies and Management (Cognitive Approach): Research Tools]. Cheljabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2011. 524 p.

8. Kazarinov L.S., Vernergold A.R., Kolesnikova O.V. [Automated Control of Rotary-Kiln Process Energy Efficient on Based Optimal Correction of Technological Operation Parameters]. *The Bulletin of South Ural State University. Ser. Computer Technology, Control, Electronics*, 2010, no. 2 (178), pp. 73–78. (in Russ.)

9. Kazarinov L.S., Vernergold A.R., Kolesnikova O.V. [Automated Control System of Rotary-Kiln Process Energy Efficient]. *Integration of science and production*, 2010, no. 5, pp. 60–61. (in Russ.)

10. Kozlov P.A. *Vel'ts-protsess* [Rotary-Kiln Process]. Moscow, Ore and Metals Publ., 2002. 176 p.

11. V.G. Lisienko, Y.M. Schelokov, M.G. Ladygichev *Vrashchayushchiesya pechi: teplotekhnika, upravlenie i ekologiya: Spravochnoe izdanie: v 2-h knigakh* / [Rotary Kiln: Heating Equipment, Control and Ecology: Reference Edition: in 2 books]. Moscow, Heating Engineer Publ., 2004. 588 p.

12. Rutkovskiy A.L., Saakyants A.A., Starikova T.V. [Simulation of Furnacing Process in Rotary-Kiln]. *The Bulletin of Universities: Non-Ferrous Metallurgy*, 2005, no. 1, pp. 66–68. (in Russ.)

13. Hodov N.V. *Razrabotka i issledovanie sposoba vel'tsevaniya s tsirkulyatsiey koksika klinkera v sisteme "gazovyy potok-shiht"*: avtoreferat dissertatsii [Development and Research of Rotary-Kiln Process with Coke Fines Circulation in System «Gas Flow-Furnace»: abstract of a thesis]. North Caucasian mining and metallurgical institute, Ordzhonikidze, 1974. 30 p.

14. Hodov N.V., Eputaev G.A., Davidson A.M. [Mathematical description of Rotary-Kiln Operations as an Object with Distributed Parameters]. *The Bulletin of North-Caucasian Mining and Metallurgical Institute*, 1973, vol. XXXIII, pp. 17–19. (in Russ.)

Received 12 September 2014