

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ВЕЛЬЦ-ПРОЦЕССОВ

А.Р. Вернергольд

Приведено краткое описание и общая структура процесса вельцевания цинковых кеков. Рассмотрен общий вид экстремальных характеристик режимов вельц-печи. Предложен метод идентификации указанных характеристик по статистическим данным эксплуатации. На основе построенных характеристик предложена процедура оптимизации режима вельцевания цинковых кеков, которая состоит 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 потребления коксовой мелочи. Предложен метод оценки производительности вельц-печи при неполной наблюдаемости состояния процесса вельцевания цинковых кеков для практической реализации управления режимами вельц-печи. Рассмотрена общая структура системы управления режимами вельц-печи, на основе которой наряду с задачами контроля и стабилизации режимных параметров решается оперативная задача оптимизации режимов вельц-печи.

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

AUTOMATED CONTROL OF ROTARY-KILN PROCESS ENERGY EFFICIENT

A.R. Verner gold

Brief description and the overall structure of the rotary-kiln operations is given. Rotary-kiln extremum characteristics are considered. Identification method of rotary-kiln extremum characteristics by using statistical data is proposed. Optimization procedure of it 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. The method of rotary-kilns performance evaluation at partial observability of the rotary-kiln process state is proposed. The proposed method can be used to control the rotary-kilns modes. The overall structure of the rotary-kilns mode control system is considered. The use of the control

system allows to solve problems of control, mode parameters stabilization and optimization of rotary-kilns modes.

Keywords: rotary-kiln operations, rotary-kiln, optimization, automated control.

Введение

Производство цинка – одно из основных направлений цветной металлургии страны. В последние годы резко увеличилась конкуренция на рынке цинка. Для сохранения своих позиций перед заводами возникла проблема увеличения производства цинка с улучшением его качества и уменьшением затрат на производство, особенно энергетические ресурсы. Это определило необходимость реконструкции заводов с ориентацией на внедрение современных информационных технологий.

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.). 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 извлекаемый металл возгоняется. Возогнаный металл увлекается газами, образующимися в печи, и улавливается в виде пыли. Процессы вельцевания рассмотрены в работах [1-15].

На качество процесса вельцевания сильно влияют нестабильность основных параметров, отсутствие автоматизированного контроля и управления локальными и сквозными параметрами, неопределенность параметров рабочего режима, обеспечивающих высокий выход вельц-оксида. Все это сдерживает рост объемов, производимых вельц-цехом. Поэтому актуальной задачей повышения качества процесса вельцевания является его автоматизация. Автоматизация контроля и поддержания технологического процесса обеспечит более точную диагностику возникающих отклонений в процессе вельцевания, своевременное оповещение о них оператору, автоматическую регулировку режимов. Это даст высокую устойчивость и качество технологического процесса, снижение вероятности возникновения аварийных ситуаций, возможность удержания параметров технологического режима в зоне максимального выхода вельц-оксида при минимизации энергетических затрат.

1. Обобщенная структура собственно процесса вельцевания цинковых кеков

Обобщенная структура собственно процесса вельцевания цинковых кеков представлена на рис. 1.

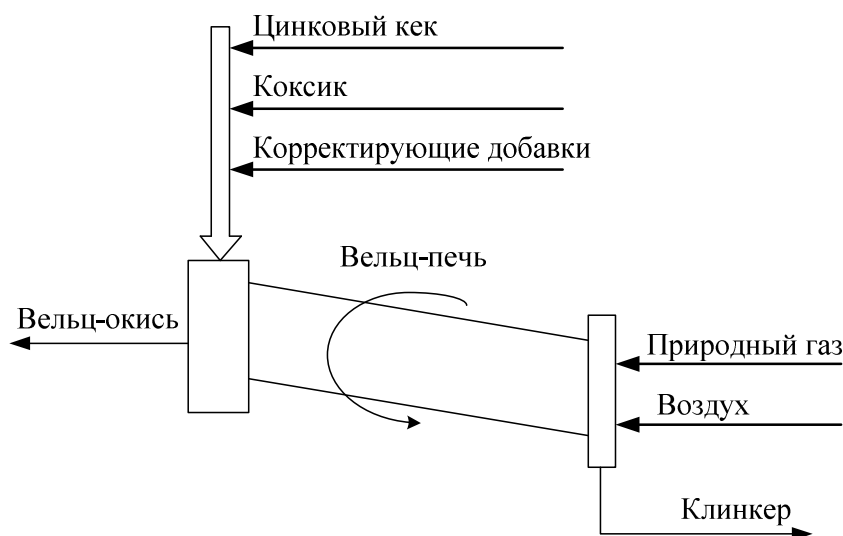


Рис. 1. Общая структура процесса вельцевания цинковых кеков

Цинковый кек для извлечения металлов (цинка, индия, кадмия, свинца и меди) смешивают с коксовой мелочью и нагревают до 1250-1350°C в вельц-печи. В качестве корректирующих добавок используются известняк и формовочный песок. Технологический воздух используется для интенсификации процессов горения углерода и окисления паров цинка, свинца и кадмия, поддержания необходимой температуры в реакционной зоне. Принудительная подача воздуха используется также для эффективного сжигания природного газа при разогреве печи. Природный газ используется для сушки и разогрева футеровки печи при ее пуске, а также для разогрева материала после остановок печи и технологических нарушений. Оптимальным является ведение процесса без использования природного газа.

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.

Здесь 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; \mathbf{x}_{opt} - оптимальное значение вектора режимных параметров; **I, II, III, IV** - характерные области диаграммы режимов.

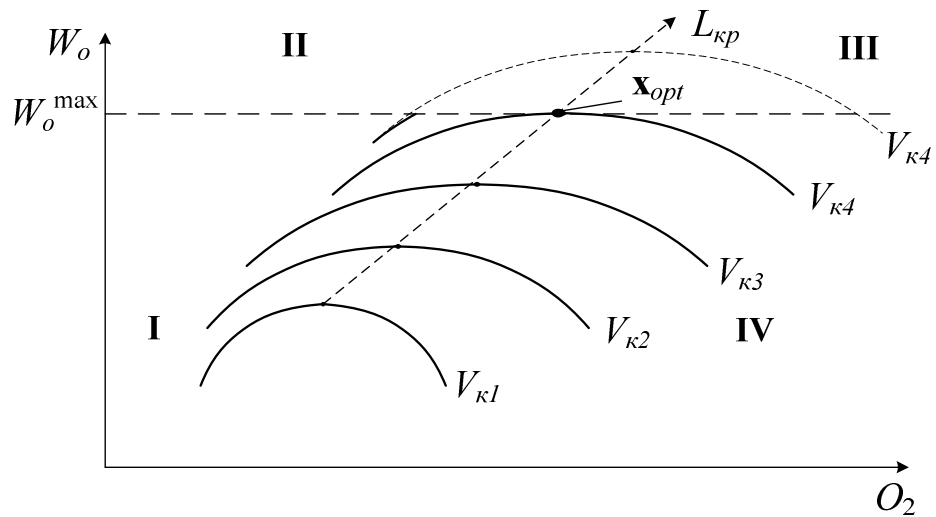


Рис. 2. Общий вид экстремальных характеристик вельц-печи

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_{kp}) 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-оксида от объема подаваемого дутья и расхода коксовой мелочи, представленной на рис. 2, имеет вид:

$$W_o = a_0 + a_1 V_k - (a_2 + a_3 V_k) (O_2 - (a_4 + a_5 V_k))^2, \quad (1)$$

где a_i ($i \in [0, 5]$) – 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 [8]:

$$y = \mathbf{W}_o[\mathbf{a}](\mathbf{x}) \approx \mathbf{W}_o[\mathbf{a}_0](\mathbf{x}) + \sum_{i=0}^5 \Delta a_i g_i(\mathbf{x}), \quad (2)$$

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:

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

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

$$g_2 = \frac{\partial W_o}{\partial a_2} = -(O_2 - (a_4 + a_5 V_\kappa))^2; \quad (5)$$

$$g_3 = \frac{\partial W_o}{\partial a_3} = -V_\kappa (O_2 - (a_4 + a_5 V_\kappa)); \quad (6)$$

$$g_4 = \frac{\partial W_o}{\partial a_4} = 2(a_2 + a_3 V_\kappa) (O_2 - (a_4 + a_5 V_\kappa)); \quad (7)$$

$$g_5 = \frac{\partial W_o}{\partial a_5} = 2(a_2 + a_3 V_\kappa) (O_2 - (a_4 + a_5 V_\kappa)) V_\kappa. \quad (8)$$

Значения коэффициентов Δa_i линейной зависимости (2) на совокупности статистических данных эксплуатации можно определить, например, методом наименьших квадратов. В этом случае исходная статистика представляет собой множество данных:

$$\{O_{2s}; V_{\kappa s}; W_{os} : s \in I_s\},$$

где I_s – множество статистических данных.

На основе исходной статистики с использованием формул (3)-(8) определяется таблица данных

$$\{\{g_{is}\}; W_{os} : s \in I_s\}.$$

Полученная таблица непосредственно используется для определения значений коэффициентов Δa_i линейной зависимости (2).

Зная значения Δa_i , можно уточнить искомые значения структурных параметров зависимости (1)

$$a_{i,1} = a_{i,0} + \Delta a_i, \quad i \in [0, 5]. \quad (9)$$

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

$$\mathbf{a}_0, \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots \quad (10)$$

Если последовательность (10) сходится:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|\mathbf{a}_k - \mathbf{a}_{k-1}\| = 0, \quad (11)$$

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 характеристиках оператору вельц-печи ставится задача оптимизации режима вельц-процесса. Процедура оптимизации режима вельц-процесса заключается в следующем.

1⁰. Удержание дутья на траектории крутого восхождения:

– увеличить подачу дутья в случае, если

$$\frac{\partial W_o}{\partial O_2} > 0; \quad (12)$$

– уменьшить подачу дутья в случае, если

$$\frac{\partial W_o}{\partial O_2} < 0. \quad (13)$$

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

$$\frac{\partial W_o}{\partial O_2} = 0; \quad \frac{\partial W_o}{\partial L_{кр}} > 0. \quad (14)$$

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

$$\frac{\partial W_o}{\partial O_2} = 0; \quad \frac{\partial W_o}{\partial L_{кр}} = 0; \quad \frac{\partial E_{кр}}{\partial L_{кр}} < 0, \quad (15)$$

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

$$E_{кр} = \frac{W_o}{V_k}. \quad (16)$$

5. Особенности практической реализации эффективного управления вельц-печью

Практическая реализация рассмотренного метода эффективного управления режимами вельц-печи встречает ряд сложностей, связанных с неполной наблюдаемостью состояния вельц-процесса и необходимостью использования нечетких оценок оператора печи.

Прежде всего, вследствие технологических особенностей вельц-процесса представляет определенные сложности точное измерение в реальном времени производительности вельц-печи.

В АСУ ТП вельц-печи №5 ОАО «ЧЦЗ» в реальном времени измеряется текущий уровень вельц-оксида в силосах отделения пылеулавливания. При достижении уровня определенного значения вельц-окисль из силосов посредством донных шнековых питателей поступает в камерные насосы и пневмотранспортом подается в приемный узел отделения РФГ вельц-цеха. Данный процесс является нестабильным и подверженным возмущающим воздействиям. В работе для более точной оценки производительности используется обработка текущего сигнала уровня вельц-оксида экспоненциальным фильтром второго порядка. Производительность оценивалась по огибающей усредненной характеристике экстремальных значений скорости заполнения силосов отделения пылеулавливания вельц-окисью [5].

Иллюстрация оценки производительности вельц-печи приведена на рис. 3.

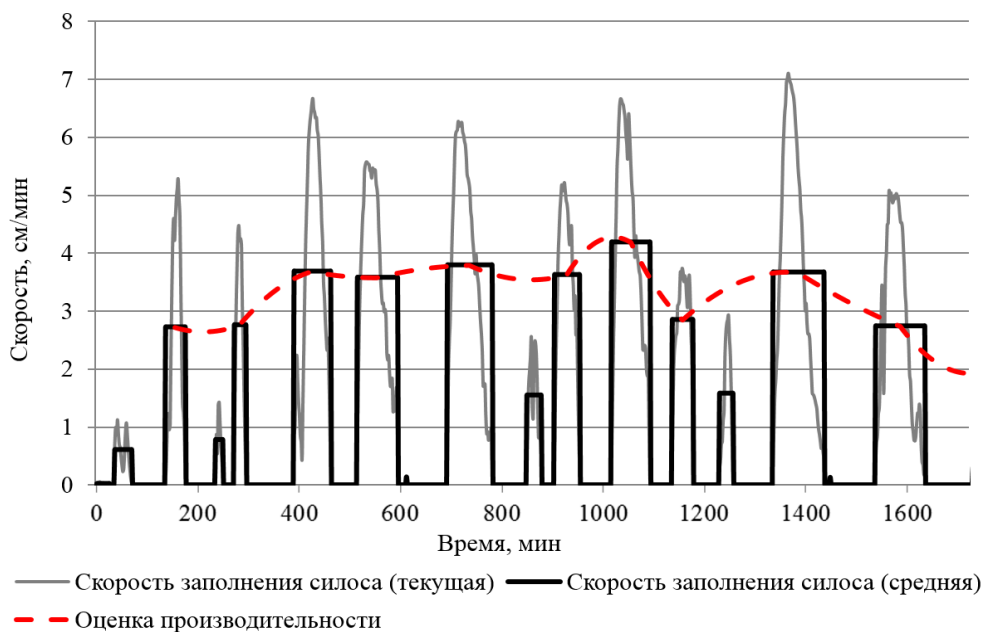


Рис. 3. Оценка производительности вельц-печи

Общая структура системы управления режимами вельц-печи

На рис. 4 представлена общая структура системы управления режимами вельц-печи.

На рис. 4 приняты следующие обозначения: ΔV_k – коррекция значения расхода коксовой мелочи $\Delta V_{k,0}$, принятого для текущего технологического режима; ΔO_2 – коррекция значения объема подачи дутья $O_{2,0}$, принятого для текущего технологического режима.

Значения ΔV_k и ΔO_2 определяются в блоке коррекции на основе текущих неуправляемых факторов: отклонения параметров шихты от номинального значения, температуры наружного воздуха и др. В блоке идентификации определяется зависимость $W_o(V_k, O_2)$ текущего режима вельц-печи. На основе всей совокупности данных осуществляется построение диаграмм текущего режима вельц-печи. Все данные: входные и выходные параметры технологического процесса, графики зависимости $W_o(V_k, O_2)$, соответствующие текущему режиму, а также точка, характеризующая оптимальный режим по текущим данным, отображаются на экране рабочего места оператора.

Измерение режимных параметров технологического процесса вельцевания цинковых кеков с целью их контроля осуществляется на основе технических средств нижнего уровня автоматизированной системы управления вельц-печью. Кроме технических средств для определения значений технологических параметров, в частности химического состава клинкера, используются методики выполнения измерений массового содержания веществ (цинка, меди, углерода и др.).

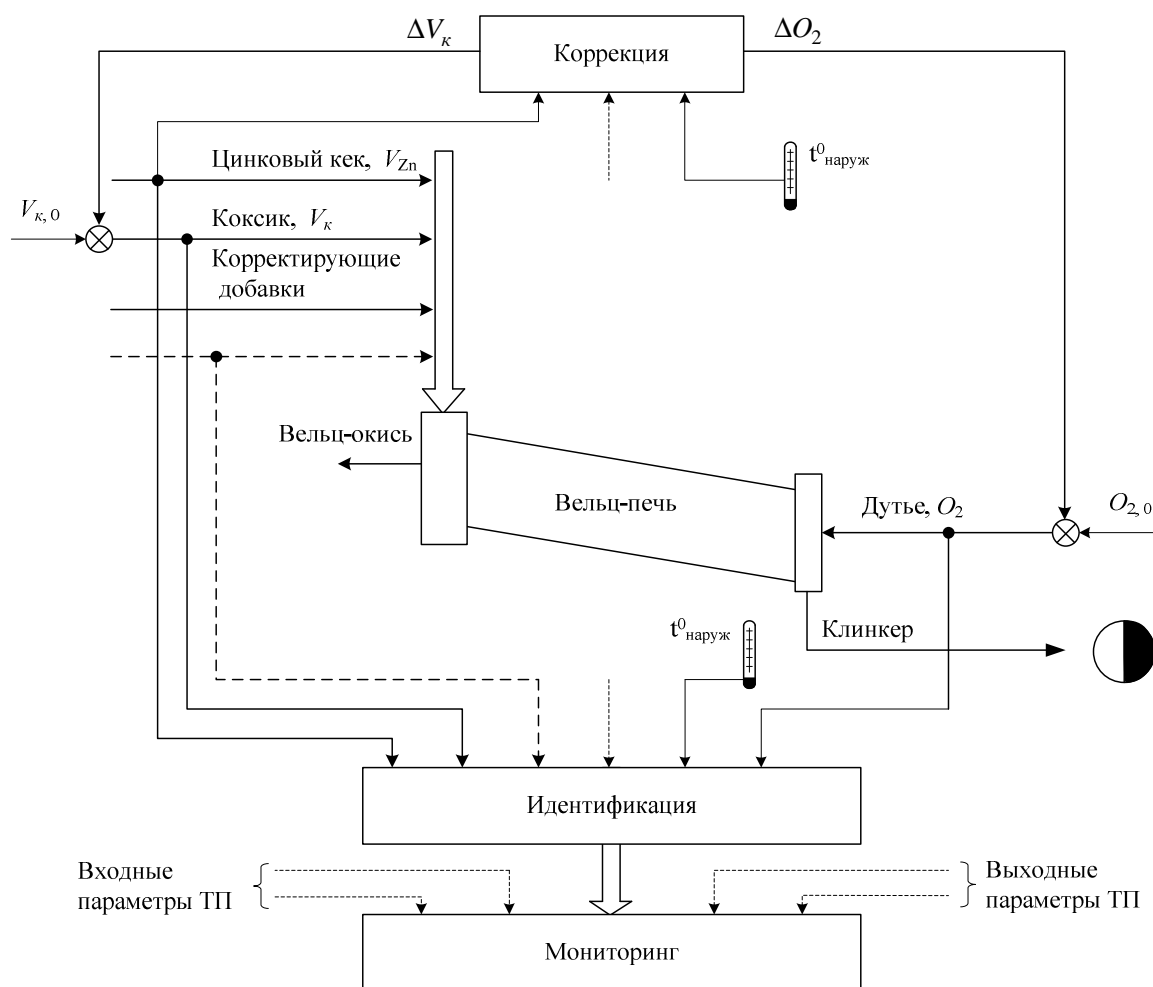


Рис. 4. Структура системы управления режимами вельц-печи

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.

В работе предложен метод оценки производительности вельц-печи при неполной наблюдаемости состояния процесса вельцевания цинковых кеков для практической реализации управления режимами вельц-печи.

Библиографический список

1. Абдеев, М.А. Вельцевание цинк-свинецсодержащих материалов / М.А. Абдеев, А.В. Колесников, Н.Н. Ушаков. – М.: Металлургия, 1985. – 120 с.
2. Вернергольд, А.Р. 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. Вернергольд, А.Р. Оценка производительности вельц-печи при неполной наблюдаемости состояния вельц-процесса / А.Р. Вернергольд, Л.С. Казаринов, О.В. Колесникова // Актуальные проблемы технических наук: сборник статей Международной научно-практической конференции (2015 г., г. Уфа). – Уфа: АЭТЕРНА, 2015. – 192 с. – С. 41-43.

6. 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.

7. Динцис, Н.П. Исследование тепломассопереноса по основным зонам вельц-печи / Н.П. Динцис, А.М. Давидсон, Г.А. Епугаев, Н.В. Ходов // Цветная металлургия. – 1977. – № 2. – С. 98–101.

8. Казаринов, Л.С. Системные исследования и управление /когнитивный подход/: научно-методическое пособие / Л.С. Казаринов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ: Издатель Т. Лурье, 2011. – 524 с.

9. 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.

10. 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.

11. Козлов, П.А. Вельц-процесс / П.А. Козлов. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2002. – 176 с.

12. Лисиенко, В.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: Справочное издание: в 2-х книгах / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисенко. – М.: Теплотехник, 2004.

13. 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.

14. Ходов, Н.В. Разработка и исследование способа вельцевания с циркуляцией коксика клинкера в системе «газовый поток-шихта»: автореферат дис. ... канд. тех. наук / Н.В. Ходов. – Орджоникидзе, 1974. – 30 с.

15. 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, выпуск XXXIII, 1973.

References

1. Abdeev M.A. *Vel'tsevanie tsink-svinetssoderzhaschih materialov* [Processing of Zinc and Lead-Bearing Materials] M.A. Abdeev, A.V. Kolesnikov, N.N. Ushakov. Moscow: Publisher «Metallurgy», 1985, 120 p.
2. Vernergold A.R., Kazarinov L.S., Kolesnikova O.V., Shnayder D.A. [The Optimal Control of Rotary-Kiln Process]. *Bulletin of South Ural State University. Series «Computer Technology, Control, Electronics»*, 2008, vol. 7, № 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]. *Bulletin of South Ural State University. Series «Computer Technology, Control, Electronics»*, 2008, vol. 8, № 17 (117), pp. 61-65. (in Russ.)
4. Vernergold A.R., Kazarinov L.S., Kolesnikova O.V. [Energy efficient Control of Rotary-Kiln Process]. *Bulletin of South Ural State University. Series «Computer Technology, Control, Electronics»*, 2010, № 22 (198), pp. 75-78. (in Russ.)
5. Vernergold A.R., Kazarinov L.S., Kolesnikova O.V. [Rotary-Kilns Performance Evaluation at Partial Observability of the State of the Rotary-Kiln Process]. *Actual problems of technical sciences*, 2015. pp. 41-43. (in Russ.)
6. Davidson A.M., Rutkovskiy A.L. [On the Question of Calculating Heat Transfer in Tube Rotary-Kilns]. *Bulletin of Universities: Non-Ferrous Metallurgy*, 1999, № 3, pp. 65-67. (in Russ.)
7. 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, № 2, pp. 98-101. (in Russ.)
8. 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.
9. 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]. *Bulletin of South Ural State University. Series «Computer Technology, Control, Electronics»*, 2010, № 2 (178), pp. 73-78. (in Russ.)
10. Kazarinov L.S., Vernergold A.R., Kolesnikova O.V. [Automated Control System of Rotary-Kiln Process Energy Efficient]. *Integration of science and production*, 2010, № 5, pp. 60-61. (in Russ.)
11. Kozlov P.A. *Vel'ts-protsess* [Rotary-Kiln Process]. Moscow, Ore and Metals Publ., 2002, 176 p.
12. Lisienko V.G., Schelokov Y.M., Lisienko V.G., Ladygichev M.G. *Vrashchayushchiesya pechi: teplotekhnika, upravlenie i ekologiya: Spravochnoe izdanie: v 2-h knigah* [Rotary Kiln: Heating Equipment, Control and Ecology: Reference Edition: in 2 books]. Moscow, Heating Engineer Publ., 2004.
13. Rutkovskiy A.L., Saakyants A.A., Starikova T.V. Simulation of Furnacing Process in Rotary-Kiln [Modelirovanie protsessa plavleniya shihty v vel'ts-pechi]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya. [The Bulletin of Universities: Non-Ferrous Metallurgy]*. 2005, № 1, pp. 66-68.
14. Hodov N.V. *Razrabotka i issledovanie sposoba vel'tsevaniya s tsirkulyatsiey koksika klinkera v sisteme «gazovyy potok-shihta»: avtoreferat dissertatsii* [Development and Research of Rotary-Kiln Process with Coke Fines Circulation in System «Gas Flow-Furnace»: abstract of a thesis]. N.V. Hodov. Ordzhonikidze, 1974, 30 p.

15. Hodov N.V., Eputaev G.A., Davidson A.M. Mathematical Description of Rotary-Kiln Operations as an Object with Distributed Parameters [Matematicheskoe opisanie raboty vel'ts-pechi, kak obekta s raspredeleennymi parametrami]. *Trudy Severo-Kavkazskogo gorno-metallurgicheskogo institute. [The Bulletin of North-Caucasian Mining and Metallurgical Institute]*. 1973, vol. XXXIII.

Вернергольд Александр Рудольфович – главный энергетик ОАО «Челябинский цинковый завод»; arv@zinc.ru

Vernergold Alexander Rudolfovich – chief power engineer of «Chelyabinsk Zinc Plant» (open joint stock company); arv@zinc.ru