

ЛИНГВИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ВЕЛЬЦ-ПРОЦЕССОМ

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

Рассматриваются основные положения процесса вельцевания цинковых кеков, методика оптимизации вельц-процесса на основе лингвистических правил, алгоритм выделения области Парето оптимальных режимов в информационной базе данных АСУ ТП.

Ключевые слова: вельц-процесс, процесс вельцевания, оптимизация управления, оптимизация вельц-процесса, нечеткая логика.

Производство цинка - одно из основных направлений цветной металлургии страны. В 90-х годах 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. Это определило необходимость реконструкции заводов с ориентацией на внедрение современных информационных технологий.

Крупнейшим в РФ производителем цинка, кадмия, индия является ОАО «Челябинский цинковый завод». ОАО «ЧЦЗ» как и большинство заводов по производству цинка 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 извлекаемый металл возгоняется. Возогнанный металл увлекается газами, образующимися в печи, и улавливается в виде пыли, обогащенной возогнанным металлом.

На качество процесса вельцевания сильно влияют нестабильность основных параметров, отсутствие автоматизированного контроля и управления локальными и сквозными параметрами, не-

определенность параметров рабочего режима, обеспечивающих высокий выход вельц-оксида. Все это снижает качество процесса вельцевания.

Актуальной задачей повышения эффективности процесса вельцевания является автоматизация управления в рамках АСУ ТП. Задачи данного класса рассматривались в литературе, главным образом для цементного производства [1-4]. Вопросы управления процессом вельцевания цинковых кеков с точки зрения эффективности производства освещены в работах [5, 6]. Однако задача использования современных методов обработки информации в АСУ ТП с целью оптимизации процесса вельцевания изучена недостаточно.

1. Постановка задачи

Процесс вельцевания цинковых кеков производится во вращающихся печах. Общая структура процесса представлена на рис. 1.

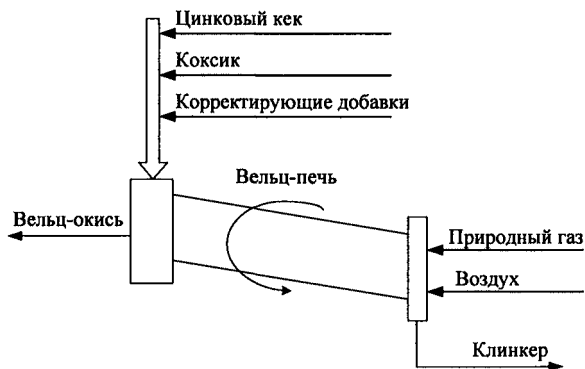


Рис. 1. Структура вельц-процесса

Цинковый кек содержит около 20 % цинка, индий, кадмий, свинец, медь. Для извлечения этих металлов его смешивают с коксовой мелочью и нагревают до 1250-1350 °С в вельц-печи. Тепло выделяется за счёт сгорания коксовой мелочи и экзотермических реакций. В качестве флюсующих добавок, позволяющих оптимизировать вельц-процесс при переработке цинковых кеков, используются известняк и формовочный песок. Технологический воздух используется для интенсификации процессов горения углерода и окисления паров цинка, свинца и кадмия, поддержания необходимой

Вернергольд Александр Рудольфович - начальник цеха КИП, главный метролог ОАО «Челябинский цинковый завод»; arv@zinc.ru.

Казаринов Лев Сергеевич - д.т.н., профессор, декан приборостроительного факультета ЮУрГУ, заведующий кафедрой автоматики и управления ЮУрГУ; kazarinov@ait.susu.ac.ru.

Колесникова Ольга Валерьевна - к.т.н., доцент кафедры автоматики и управления ЮУрГУ; popova_ov@ait.susu.ac.ru.

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. Продуктами вельцевания являются вельц-окись, которая возгоняется, охлаждается и улавливается рукавными фильтрами, и медистый клинкер. В вельц-окиси содержится около 75 % оксида цинка, оксиды кадмия, индия и свинца. Медистый клинкер содержит 3-4 % меди и 30-35 % железа. Вельц-окись направляется на выщелачивание, а клинкер отгружается на медные предприятия.

В соответствии с работой [5], в качестве критериев оптимизации вельц-процесса можно принять следующие:

- максимальное содержание оксида цинка в пыли, которую выносят из печи протекающие газы $\max M_{ZnO}$; (1)
- максимальное повышение CO_2 в отходящих газах

$$\max V_{CO_2}; \quad (2)$$

- минимальный объем дутья (воздуха) при удовлетворении допусков на режимные параметры вельц-процесса

$$\min V_{O_2}. \quad (3)$$

Смысл этих критериев достаточно очевиден: критерий (1) отражает выход целевого продукта вельц-печи; максимальное содержание CO_2 в отходящих газах (критерий (2)) обеспечивает полное выгорание в печи составляющей углерода, являющейся основным источником тепла вельц-процесса; минимизация расхода кислорода K_{O_2} (критерий (3)) соответствует минимальной подаче воздуха в печь. Здесь, если подается избыток воздуха, то тепло выдувается из печи и снижается ее энергетическая эффективность. При недостатке воздуха наблюдается неполное выгорание соответствующей составляющей углерода и невыработка тепловой энергии, что также снижает эффективность печи.

В процессе эксплуатации печи наблюдаются различные режимы ее работы, которые зависят от параметров загрузки печи и параметров ведения вельц-процесса. Каждому режиму ведения вельц-процесса соответствует свой набор результирующих показателей:

$$\{(M_{ZnO}, V_{CO_2}, V_{O_2})_s : s \in 1, 2, \dots, N\}, \quad (4)$$

где $(M_{ZnO}, V_{CO_2}, V_{O_2})_s$ - вектор наблюдаемых базовых показателей эффективности режимов; s - индекс наблюдаемых режимов печи; N - количество режимов.

В общем случае ведение вельц-процесса не является оптимальным. Формально это означает, что для некоторого 5-го режима, характеризующегося наблюдаемыми значениями показателей эф-

фективности $(M_{ZnO}, V_{CO_2}, V_{O_2})$, можно указать резервы повышения показателей эффективности: повышение M_{ZnO} , V_{CO_2} и снижение V_{O_2} . Для оптимальных режимов невозможно осуществить улучшение одного из показателей без ухудшения других показателей. Как известно из теории оптимизации, совокупность неулучшаемых решений образуют область Парето в задачах оптимизации. Представляется целесообразным из множества всех наблюдаемых режимов ведения вельц-процесса выделить Парето-оптимальные режимы. Зная набор Парето-оптимальных режимов, можно рассчитать для них тепловой и материальный балансы, которые, в свою очередь, могут служить основой для оптимального ведения вельц-процесса.

В данной работе приводится алгоритм выделения Парето-оптимальных режимов в рамках ведения информационной базы данных АСУ ТП.

2. Алгоритм выделения области Парето-оптимальных режимов в информационной базе данных

Будем теоретически представлять уравнение области Парето соотношением:

$$y = f[\mathbf{a}](\mathbf{x}), \quad (5)$$

где y - объем воздушного дутья; \mathbf{x} - вектор технологических факторов, в данном случае, состоящий из двух факторов: M_{ZnO} и V_{CO_2} , \mathbf{a} - вектор структурных параметров зависимости (5).

Отклонение данных эксплуатации от теоретического значения, определяемого областью Парето, определим соотношением

$$e_s = y_s - f[\mathbf{a}](\mathbf{x}_s), \quad s = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

s - индекс статистического наблюдения.

Для того чтобы выделить область Парето, на отклонение от указанной области введем штрафную функцию (рис. 2).

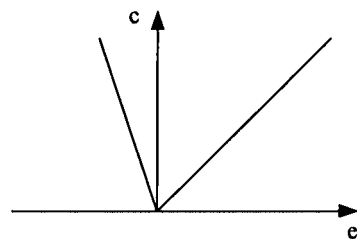


Рис. 2. Штрафная функция

Суммарный штраф при отклонении данных эксплуатации от области Парето:

$$C = \sum_s S_m^2 |e_s^-|^2 + \sum_s |e_s^+|^2, \quad (7)$$

где e_s^- , e_s^+ - отрицательные и положительные значения отклонений экспериментальных данных от области Парето; S_m - величина штрафа при наличии отклонения экспериментального значения

показателя y_s ниже теоретического значения, определяемого областью Парето $f[\mathbf{a}](\mathbf{x}_s)$.

Ставится задача найти аналитическое выражение области Парето по критерию минимума суммарного штрафа (7) на данных эксплуатации.

Сначала предположим, что выражение отклонения (6) можно представить в виде линейной функции:

$$e_s = y_s - \sum_{j=0}^n a_j x_{js}, \quad n = 1, 2. \quad (8)$$

Условия минимума суммарного штрафа:

$$\frac{\partial C}{\partial a_i} = -2S_{\text{ш}}^2 \sum_s 1\left(\left|e_s^-\right|\right) \left(y_s - \sum_{j=0}^n a_j x_{js}\right) x_{is} - 2 \sum_s 1\left(\left|e_s^+\right|\right) \left(y_s - \sum_{j=0}^n a_j x_{js}\right) x_{is} = 0, \quad i = 0, 1, \dots, n, \quad (9)$$

где $1\left(\left|e_s^-\right|\right)$, $1\left(\left|e_s^+\right|\right)$ – единичные функции.

Решение линейного алгебраического уравнения:

$$\sum_{j=0}^n g_{ij} a_j = d_i, \quad i = 0, 1, \dots, n; \quad (10)$$

$$g_{ij} = S_{\text{ш}}^2 \sum_s 1\left(\left|e_s^-\right|\right) x_{is} x_{js} + \sum_s 1\left(\left|e_s^+\right|\right) x_{is} x_{js};$$

$$d_i = S_{\text{ш}}^2 \sum_s 1\left(\left|e_s^-\right|\right) y_s x_{is} + \sum_s 1\left(\left|e_s^+\right|\right) y_s x_{is}.$$

Решение задачи (10) осуществляется итерационно на основе последовательных решений соответствующей системы линейных алгебраических уравнений (10), определяющих минимизацию целевой функции (7) методом наискорейшего спуска.

В случае нелинейной функции $f[\mathbf{a}](\mathbf{x}_s)$ задача решается методом Ньютона. В этом случае постановка задачи (6), (7) линеаризуется в виде (8) и решение ведется итерационно с использованием решений системы уравнений (10).

В результате будет получено аналитическое выражение области Парето (5), с помощью которого можно характеризовать режимы работы печи как оптимальные или неоптимальные.

3. Нечеткие зависимости (лингвистические правила) в управлении процессом вельцевания

Оперативное управление процессом вельцевания целесообразно осуществлять на основе нечетких зависимостей (лингвистических правил), которые более адекватно отражают реальные процессы управления печью человеком-оператором. Преимущество использования лингвистических правил состоит в том, что они позволяют:

- учесть качественные суждения и качественный опыт управления печами;
- создавать правила для нечетких ситуаций управления печью, когда не известны причины

отклонений параметров режимов от номинальных значений;

- органично вписываются в формат инструкций оператора печи по рациональному ведению режимов.

Нечеткие правила необходимо формулировать для приведения текущих режимов печи к Парето-оптимальным режимам, методика выделения которых приведена выше. Другими словами, нечеткие правила должны представлять собой инструкции оператору как при наличии отклонений режимных параметров привести их к Парето-оптимальным значениям.

В рамках указанного подхода состояние печи представляется лингвистическими переменными, а задача оперативного управления структурируется на основе следующих категорий: «Отклонение», «Причина», «Действие», «Результат», «Оценка». Под отклонением понимается отклонение режимных параметров печи от расчетных значений. Эти отклонения выражаются:

- в случае количественной оценки – числом;
- в случае качественной оценки отклонения

определяются: «много ниже нормы», «ниже нормы», «несколько ниже нормы», «норма», «несколько выше нормы», «выше нормы», «много выше нормы». По категории «Причина» указываются причины возникших отклонений. Под действием понимается корректирующие действия, выполняемые оператором для того, чтобы привести текущий режим к расчетному режиму. Действия измеряются по качественной шкале – шкале интенсивности: «значительно добавить», «добавить», «слегка добавить», «расчетное действие», «слегка убавить», «убавить», «значительно убавить». Результат выражается количественными оценками для базовых параметров: M_{Zn0} , V_{CO2} , V_{O2} . Для категории «Оценка» вводится шкала оценок со следующими градациями: «оптимально», «субоптимально», «допустимо», «недопустимо».

В указанных шкалах создается реляционная база данных по ведению технологического процесса печи, форма заполнения которой приведена в табл. 1. В результате формируется статистика ведения режимов печи. На основе статистической обработки выявляются правила оптимального управления процессом вельцевания.

Предложенный подход позволяет улучшить процесс вельцевания за счет приведенных выше градаций. Так, например, содержание цинка и свинца в клинкере может превышать установленную норму. Причиной этого отклонения может являться повышенная загрузка печи или недостаточная подача вторичного воздуха.

В типовой технологической инструкции говорится, что в случае повышенной загрузки печи необходимо снизить загрузку, в случае недостаточной подачи вторичного воздуха увеличить его подачу. Применение нечеткой логики позволяет формулировать действия для улучшения процесса

в терминах, более понятных человеку-оператору, например, слегка убавить загрузку печи, значительно убавить загрузку печи или слегка добавить подачу вторичного воздуха, значительно добавить подачу вторичного воздуха.

В технологической инструкции по переработке цинковых кеков вельцеванием в условиях ком-

плекса вельц-печи № 5 ОАО «ЧЦЗ» имеются данные по отклонениям, носящим технологический характер, а также указаны причины отклонений и меры по нормализации процесса. Фрагмент указанных данных приведен в табл. 2. Однако, как можно видеть из табл. 2, в технологической инструкции отклонения и действия по устранению от-

Таблица 1

Форма заполнения реляционной базы данных по ведению технологического процесса печи

Отклонение	Причина	Действие	Результат			Оценка
			M_{ZnO}	V_{CO_2}	V_{O_2}	
...

Таблица 2

Фрагмент технологической инструкции по переработке цинковых кеков вельцеванием в условиях комплекса вельц-печи № 5 ОАО «ЧЦЗ»

Отклонение	Причина отклонения	Меры по нормализации процесса
<i>Приготовление шихты в барабане-грануляторе</i>		
Шихта пылит	<ul style="list-style-type: none"> Шихта включает избыточное количество пылевидных материалов и кокса сорта «Б». Отсутствует подача цинкового кека 	<ul style="list-style-type: none"> Проверить загрузку транспортера № 0–5 шихтовыми материалами из питателей № 1–3. Обеспечить подачу кека, отрегулировать подачу сухих компонентов шихты
	<ul style="list-style-type: none"> Недостаточное содержание влаги в шихте 	<ul style="list-style-type: none"> Увлажнить шихту подачей пульпы шлама очистных сооружений из бака № 0–26 насосом № 0–27. Отрегулировать подачу пульпы в барабан
Шихта вязкая, выгружается из барабана большими комьями	<ul style="list-style-type: none"> Недостаточная подача сухих компонентов в шихту 	<ul style="list-style-type: none"> Проверить загрузку транспортера № 0–5 сухими материалами (кокс сорта «Б», флюс), отрегулировать при необходимости
	<ul style="list-style-type: none"> Избыточное увлажнение шихты 	<ul style="list-style-type: none"> Снизить расход пульпы в барабан-гранулятор вплоть до отключения насоса № 0–27
Недостаточное перемешивание шихты	<ul style="list-style-type: none"> Перегрузка барабана-гранулятора 	<ul style="list-style-type: none"> Снизить суммарную загрузку транспортера № 0–5 из питателей (сохраняя заданные соотношения)
<i>Вельцевание</i>		
Повышенная температура в верхней головке печи (более 800–850 °С)	<ul style="list-style-type: none"> Увеличенная тяга печи, перегрев материала 	<ul style="list-style-type: none"> Уменьшить тягу печи. Прекратить подогрев печи газовой горелкой, уменьшить принудительную подачу воздуха в печь
	<ul style="list-style-type: none"> Недостаточная загрузка шихты в печь 	<ul style="list-style-type: none"> Увеличить загрузку шихты
Образование железистых криц (шаров) в печи	<ul style="list-style-type: none"> Высокое содержание железа в шихте при недостатке кремнезема. Избыток коксовой мелочи в шихте. Перегрев материала в печи. Сокращение операции «сварачивания ванны» в печи 	<ul style="list-style-type: none"> Сократить расход коксовой мелочи. Скорректировать состав шихты для следующей загрузки. Операцию «сварачивания ванны» вести, не допуская перегрева материала. Остановить печь и извлечь образовавшиеся крицы. Не допускать увеличения размеров криц в печи до критических, затрудняющих их выгрузку
Образование металлизированной настывли около разгрузочного конуса печи	<ul style="list-style-type: none"> Высокое содержание железа в шихте при недостатке кремнезема. Избыток коксовой мелочи в шихте 	<ul style="list-style-type: none"> Скорректировать состав шихты. Не допускать перегрева материала. Образовавшуюся настывль выплавить, увеличив содержание кремнезема (песка) в шихте или выжечь, подавая на нее кислород

клонений не имеют градаций, отсутствует категория «Результат», а также не производится оценка режима процесса вельцевания после принятия мер по устранению отклонений параметров вельц-печи от расчетных значений.

Выводы

1. При автоматизации управления процессами вельцевания цинковых кеков наряду с задачами контроля и стабилизации режимных параметров целесообразно решать задачу оптимизации режимов процессов вельцевания.

2. Решение задачи оптимального управления вельц-процессом осуществляется на основе выявления области Парето в пространстве основных показателей эффективности указанного процесса.

3. В работе предложен алгоритм выделения области Парето оптимальных режимов в информационной базе данных АСУ ТП.

4. Применение предложенного алгоритма выделения области Парето позволяет организовать оптимальное управление технологическим процессом в печи, обеспечивающее повышение его эффективности.

5. В работе предлагается оперативное управление процессом вельцевания осуществлять на основе нечетких зависимостей (лингвистических правил), которые должны представлять собой

6. инструкции оператору как при наличии отклонений режимных параметров привести их к Парето-оптимальным значениям.

Литература

1. Лисиенко, В. Г. *Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: справочное издание: в 2 кн.* / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгин. - М.: Теплотехник, 2004. - 588 с.

2. Krings, L. *LINKman in cement production: optimization beyond traditional control* / L. Krings, D. W. Haspel // *ABB Review*. - 1995. - №7. - С 32-38.

3. Stadler, K. S. *Model predictive control of the calciner at Holcim's Lagerdorf plant with the ABB Expert Optimizer* / K. S. Stadler, B. Wolf, E. Gallestei // *ZKG International*. - 2007. - №3.

4. Галлестей, Э. *Новые подходы к работе в цементной промышленности* / Э. Галлестей, Д. Кастаньоли, К. Колберт // *ABB Review*. - 2004. - №2. - С. 13-19.

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

6. Авдеев, М. А. *Вельцевание цинк-свинцоводержащих материалов* / М. А. Авдеев, А. В. Колесников, Н. Н. Ушаков. - М.: Металлургия, 1985. - 120 с.

Поступила в редакцию 19 мая 2008 г.