

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

DOI: 10.15593/2224-9400/2018.3.03

УДК 66.012-52

**А.Г. Шумихин, С.Н. Кондрашов**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

**А.В. Малышенко**

ООО «Ин-Верро», Пермь, Россия

### АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СТАДИИ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ КАРНАЛЛИТА ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ В ПРОИЗВОДСТВЕ МАГНИЯ

*Рассмотрены результаты анализа особенностей управления оперативным персоналом технологическим процессом стадии обезвоживания карналлита во вращающейся печи в производстве магния, позволившие сделать основной вывод о том, что для оперативного управления стадией следует применить концепцию интеллектуальной автоматизированной системы, построенной на основе продукционных моделей представления знаний, отражающих опыт квалифицированных операторов-технологов.*

*Магний является одним из важнейших для экономики России производимых ресурсов. Повышение эффективности управления технологическими процессами стадий производства магния во многом может быть достигнуто применением эффективных автоматизированных систем. Выбору концепции автоматизированной системы управления каждой стадией должен предшествовать анализ особенностей управления технологическим процессом стадии оперативным персоналом. Поэтому актуальным является обследование стадий производства магния, в частности, стадии обезвоживания карналлита во вращающихся печах, анализ особенностей подхода к управлению технологическими процессами и функций существующих систем автоматизации.*

*С целью оценки степени проработанности проблемы управления технологическим процессом стадии обезвоживания карналлита проведен анализ литературных источников. Проанализировано фактическое состояние подхода к управлению процессом обезвоживания карналлита во вращающихся печах. Определен фактически один установившийся режим ведения технологического процесса производства обезвоженного карналлита во вращающейся печи – нормальный режим. Выявлены качественные признаки и количественные значения изменения величин технологических параметров, указывающие на отклонение от нормального режима ведения процесса обезвоживания. Дано описание возможных управляющих воздействий и дейст-*

*вий оперативного персонала для возврата технологического процесса в нормальный режим работы. С этой целью осуществлено интервьюирование сменных операторов-технологов вращающейся барабанной печи.*

**Ключевые слова:** *производство магнезия, карналлит, обезвоживание, вращающаяся барабанная печь, оперативное управление, интеллектуальная автоматизированная система.*

**A.G. Shumikhin, S.N. Kondrashov**

Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russian Federation

**A.V. Malysenko**

LLC «In-Verro» Perm, Russian Federation

**ANALYSIS OF THE SPECIFICITY  
OF THE OPERATIONAL MANAGEMENT PROCESS  
OF THE STAGE OF DEHYDRATION OF CARNALLITE  
IN ROTARY KILNS PRODUCTION OF MAGNESIUM**

*The article considers the results of the analysis of management features of operational personnel of the technological process of the stage of carnallite dehydration in a rotary kiln in the production of magnesium, which allowed to make the main conclusion that for the operational management of the stage it is necessary to apply the concept of an intelligent automated system based on the production models of knowledge representation, reflecting the experience of qualified operators-technologists.*

*Magnesium is one of the most important resources for the Russian economy. The increase of efficiency of control of technological processes of magnesium production stages can be achieved in many respects by the use of effective automated systems. The selection of the concept of an automated control system for each stage should be preceded by an analysis of the features of the process control of this stage by operational personnel. Therefore, it is important to examine the stages of magnesium production, in particular, the stage of carnallite dehydration in rotating kilns, analysis of the approach to process control and functions of existing automation systems.*

*In order to assess the degree of elaboration of the problem of process control of the stage of carnallite dehydration, the analysis of literature sources was carried out. The actual state of the approach to control the process of carnallite dehydration in rotary kilns is analyzed. In fact, one established mode of conducting the technological process of production of dehydrated carnallite in a rotary kiln – the normal mode – was determined. The qualitative characteristics and quantitative values of changes in the values of technological parameters indicating a deviation from the normal mode of the dehydration process are revealed. The description of possible control actions and actions of operational personnel for the return of the process to normal mode is given. To this end, the interviewing of replacement operators-technologists of the rotating drum kiln was carried out.*

**Keywords:** *magnesium production, carnallite, dehydration, rotary drum furnace, operational control, intelligent automated system.*

Обезвоживание карналлита является одной из стадий производства магния электролитическим способом. Увеличение спроса на магний и сплавы происходит одновременно с развитием современных высокотехнологичных отраслей экономики: авиастроения, ракетостроения, автомобильной промышленности, нефтегазодобывающей отрасли.

В России на сегодняшний день действует два основных производителя магния и магниевых сплавов: ОАО «Соликамский магниевый завод» (г. Соликамск, Пермский край) и филиал «АВИСМА» ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» (г. Березники, Пермский край).

В настоящее время в мире существуют два основных способа производства магния: электролитический (российские производители, US Magnesium, DSM) и силикотермический (китайские производители). По суммарным затратам энергии последний сопоставим с электролизом, но допускает использование более дешевых, нежели электричество, энергоносителей. Однако и электролитический способ еще не исчерпал свой потенциал. Наиболее перспективной в этом способе является карналлитовая схема (рисунок) [1]. Формула карналлита:  $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$ .

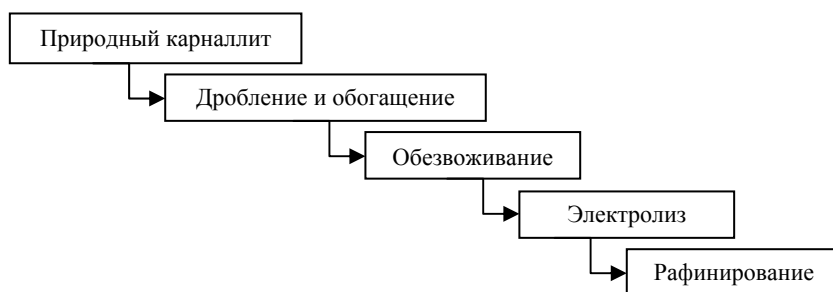


Рис. Карналлитовая схема получения магния электролизом

Рассмотрим подробнее стадию обезвоживания карналлита. В обычных условиях кристаллы карналлита содержат 6 молекул воды. Подготовка карналлита к электролизу заключается в его обезвоживании, которое обычно проводится в две стадии. На первой стадии карналлит обезвоживается в твердом состоянии до содержания влаги не выше 5 %, на второй – в расплавленном состоянии.

Первая стадия обезвоживания карналлита обычно проводится во вращающихся барабанных печах с постепенным увеличением температуры по длине печи. При медленном нагреве до 90 °С шестиводный карналлит переходит в двухводную форму, имеющую высокую темпе-

ратуру плавления (264 °С). При 150 °С двухводный карналлит переходит в безводный. Во вращающейся печи при перемещении карналлита от одного конца к другому температура его повышается, так что на выходе из печи карналлит имеет температуру 220–230 °С. В конечном продукте содержится 3–5 % H<sub>2</sub>O и 2–3 % MgO.

Вторая стадия обезвоживания осуществляется обычно путем хлорирования карналлита в расплавленном состоянии. Карналлит из вращающейся печи поступает в плавильную камеру хлоратора, где он при 500–525 °С плавится. Расплавленный карналлит затем поступает в хлораторные камеры, в которых в присутствии углеродистого восстановителя (обычно кокс) карналлит продувается газообразным хлором, в результате чего происходит обезвоживание карналлита и хлорирование оксида магния. Температура расплава в хлорных камерах поддерживается в пределах 770–750 °С. Затем расплав попадает в миксер, где отстаивается от твердых частиц и оттуда выпускается в ковш и направляется на электролиз. После обработки карналлита в хлораторе содержание влаги в нем снижается до 0,1–0,2 %, а содержание MgO до 0,2–0,3 %.

Также известен способ обезвоживания карналлита в печах с кипящим слоем. В этом случае обезвоживание идет все время в твердом состоянии. При этом может достигаться весьма глубокое обезвоживание карналлита, в результате чего может быть исключена вторая стадия обезвоживания карналлита в расплавленном состоянии [1].

Глубина обезвоживания карналлита имеет особо важное значение для следующей стадии производства магния – электролиза. Таким образом, существует задача по совершенствованию процесса обезвоживания карналлита с выпуском и дальнейшим использованием для технологии электролиза глубокообезвоженного карналлита, что в дальнейшем позволит снизить затраты на переделе электролиза.

На основании вышеизложенного становится очевидным, что получение глубокообезвоженного карналлита возможно при четком соблюдении технологического режима на обеих стадиях обезвоживания, и в первую очередь, на первой стадии – обезвоживание во вращающихся печах, так как именно на ней из карналлита удаляется наибольшее количество влаги.

Вращающиеся печи получили достаточно широкое распространение на самых различных промышленных предприятиях в мире. Они используются в промышленности при производстве цемента [2], извести [3], керамзита [4]. Вращающиеся печи применяются также в хими-

ческой промышленности при производстве минеральных солей (соды, фосфатов); в машиностроительной сфере для нагрева мелких изделий; в черной металлургии в процессах производства губчатого железа; в производстве огнеупорных материалов для обжига кусковых фракций (магнезита, шамота и т.п.); в цветной металлургии на переделах переработки отходов и полупродуктов производства свинца и цинка, кальцинации глинозема, спекания бокситовых шихт, сушки и обезвоживания алюминиевых, магниевых, никелевых руд [5]. В справочнике [5, 6] приведен полный систематизированный обзор существующих вращающихся печей для различных производств.

Вращающаяся печь представляет собой агрегат непрерывного действия с рабочим пространством в виде полого цилиндра (барабана). Основными отличиями вращающихся печей между собой являются геометрические размеры их конструкций и устройства систем загрузки и выгрузки материалов. Основными элементами вращающейся печи являются корпус (барабан), приводной механизм, опорные бандажи, загрузочная и разгрузочная камеры. Корпус печи представляет собой сварную металлическую трубу (разных диаметров и длин в зависимости от требований технологии производства), труба изнутри может быть футерована или частично футерована огнеупорным кирпичом. Для перемещения материала при вращении корпуса он наклонен к горизонту под углом. Привод печи обеспечивает ее вращение (скорость вращения может варьироваться от 0,2 до 5 об/мин).

По энергетическому признаку вращающиеся печи относятся к печам-теплообменникам с переменным по длине режимом тепловой работы [5]. На «горячем» участке печи происходит горение топлива и осуществляется радиационный режим работы печи. По мере продвижения продуктов сгорания топлива по длине печи они охлаждаются на несколько сотен градусов, и тепловой режим работы печи постепенно становится конвективным. Точное распределение в печи зон с радиационным и конвективным режимами работы зависит от вида и параметров технологического процесса [5]. В основной своей массе вращающиеся печи работают в режиме противотока. Загружаемое в печь сырье может иметь различную степень влажности, вплоть до 40 % содержания воды. Сырье подается в верхнюю (хвостовую) часть печи и медленно движется навстречу горячим газам, образующимся в результате сгорания топлива в головной части печи. Из барабана перерабатываемое сырье в порошкообразном виде поступает в холодильник, а газообразные продукты сжигания топлива

вместе с технологическими газами направляются в систему пылегазоочистки. Время пребывания сырьевой массы во вращающейся печи должно быть достаточным для завершения всех необходимых химических превращений. Увеличение и уменьшение данного времени достигается изменением конструкций полок перегревающего устройства внутри барабана и регулированием скорости вращения печи и зависит от длины печи, типа сырья и выбранного режима технологического процесса.

В зависимости от вида перерабатываемого сырья в качестве топлива для вращающихся печей могут использоваться природный газ, мазут или твердое топливо (угольная пыль, коксовая мелочь). Для сжигания топлива используются горелки типа «труба в трубе», форсунки или специальные пылеугольные горелки [5].

Вращающаяся печь как объект управления является достаточно сложным аппаратом. Основные сложности в процессе управления возникают из-за многообразия протекающих в аппарате физических и химических превращений, большого количества возмущений, взаимного влияния величин и параметров друг на друга, сложность измерения ряда параметров и их распределенность по длине печи.

Одной из важных целей управления технологическим процессом во вращающейся печи является достижение стабильного качества продукта. На практике качество продукта определяется при ручном отборе проб с периодичностью один раз в смену. Основная доля ответственности за управление технологическим процессом во вращающейся печи возложена на сменных операторов-технологов, которые, используя свой опыт и знания процесса, осуществляют контроль за непрерывным ходом производства, при этом на всем периоде времени управления объектом требуется предельно высокая концентрация их внимания. Объем нагрузки на оператора настолько велик, что он может управлять не более чем двумя печами одновременно.

Поэтому возникает необходимость в совершенствовании систем автоматизации управления вращающимися печами для более эффективного ведения технологического процесса. Решение задачи комплексной автоматизации управления технологическим процессом во вращающейся печи становится актуальной при рассмотрении основных преимуществ, которые могут быть получены в результате. Развитие функций автоматизированной системы управления и ее элементов позволит не только улучшить условия труда оператора печи, уменьшить нагрузку на него, повысить оперативность и качество принятия

им решений по управлению печью, но также позволит стабилизировать производительность и качество выходного продукта, колебания которых в основном являются следствием человеческого фактора [11].

Анализ литературных источников показывает, что существует достаточно много подходов к организации управления технологическим процессом во вращающихся печах.

В работах [7, 8] описаны компьютерные системы мониторинга и управления процессом обжига во вращающихся печах, применяемые в цементной промышленности и цветной металлургии, основанные на данных о температурном профиле наружной поверхности корпуса печи, получаемых от сканера инфракрасного излучения. Основной проблемой в таком подходе является оперативное получение оценки параметров процесса обжига внутри печи, что затруднительно из-за высокой инерционности нагрева корпуса агрегата. Поэтому эффективное применение данного подхода возможно в основном для контроля состояния огнеупорной футеровки и улучшения состояния обмазки в печи [9].

Существуют гипотезы о возможности управления температурным профилем печи по точке с максимальным значением температуры в горячей зоне, называемой «горячей точкой» [10]. Предполагается возможность поддержания температурного режима всей печи путем удерживания этой точки в заданной зоне. Проблемным моментом такого управления является дрейф этой точки по длине печи и значению температуры, который зависит от свойства и состава сырья, нагрузки агрегата, температуры факела и т.д.

Стоит отметить публикации [12, 13], посвященные разработке систем стабилизации температурного профиля обжигаемого материала, бесконтактному методу контроля температуры шихты, компьютерным системам автоматического управления процессами обжига материалов в трубчатых вращающихся печах.

Известен метод оценки состояния в зонах спекания и охлаждения вращающейся печи на основе анализа изображений, полученных с применением относительно новой области знаний – технического зрения [14]. Представляет интерес публикация [15], в которой смоделирован регулятор теплового режима (РТР) как комплексное устройство по управлению технологическим процессом во вращающейся печи обжига сырого магнезита.

Основной недостаток всех вышеуказанных способов, методов и подходов в том, что они не имеют отношения к процессу обезвоживания

карналлита во вращающейся печи. Стоит отметить лишь упоминание об управлении обезвоживанием обогащенного карналлита как объектом с большим запаздыванием [16], где автор предлагает рассматривать вращающуюся печь как объект одноконтурной системы регулирования с большим транспортным запаздыванием. Основным и существенным недостатком данного подхода является выделение только одного параметра – температуры в последней камере печи как основного показателя качества без учета остальных параметров технологического режима. Такой подход не позволит построить полноценную автоматизированную систему управления технологическим процессом обезвоживания карналлита.

В настоящее время на практике применяют управление процессом обезвоживания карналлита посредством использования одного контура регулирования – регулирования расхода топлива по температуре в смесительной камере. Фактически управление процессом операторами в нормальном режиме происходит вручную следующим образом:

- загрузка обогащенного карналлита не регулируется и устанавливается постоянной в пределах нормы, определяемой плановым отделом предприятия исходя из потребности производства (оператор устанавливает загрузку печи посредством увеличения/уменьшения высоты слоя обогащенного карналлита на скребковом конвейере системы загрузки, высота слоя выставляется поднятием/опусканием металлической пластины над скребковым конвейером);

- разрежение в пылевой камере не регулируется, дымосос работает постоянно на открытые заслонки и по падению разряжения судят о запыленности боровов после пылевой камеры;

- подача газа с целью поддержания температуры в смесительной камере изменяется оператором вручную, при этом, контролируя положение факела, оператор изменяет расход первичного дутья, изменяя соотношение расходов газ/воздух (точное поддержание необходимой температуры в смесительной камере является ключевым моментом всего технологического процесса, а выбор этой температуры осуществляется оператором исходя из визуального контроля обезвоженного карналлита на выходе из печи);

- расход вторичного дутья устанавливается условно постоянным и не регулируется в ходе технологического процесса, вентилятор работает при угле открытия заслонки, установленном на постоянном значении (оператору удобнее поддерживать температуру в смесительной камере только изменением расходов газа и первичного дутья);



- скорость вращения печи не регулируется и является постоянной величиной, задаваемой установленным редуктором (оператор не имеет возможности изменять скорость вращения печи).

Основной целью управления технологическим процессом обезвоживания карналлита является поддержание температуры в смесительной камере точно в пределах 590–610 °С при постоянной загрузке обогащенного карналлита в печь.

Описанный выше способ ручного управления время от времени приводит к перегрузке печи, в результате чего происходит явление «сваривания» карналлита в середине печи. Температура в зоне «сваривания» возрастает, качество готового продукта падает, резко растет температура на выходе в пылевой камере, повышается вероятность выхода брака. Если оператор не успел произвести своевременное снижение температуры в смесительной камере, то для возвращения процесса в нормальный режим работы может потребоваться остановка печи и чистка внутреннего пространства ее барабана.

Для сменного оператора вращающаяся печь как объект управления является «черным ящиком» и процессы превращения материала, происходящие внутри по всей длине барабана, не могут быть описаны им в явном виде. По сути при ведении технологического процесса оператор опирается, в основном, на визуальный контроль обезвоженного карналлита на выходе из печи и предпринимает действия по управлению процессом исходя из следующих характеристик продукта: равномерного цвета, размера гранул, отсутствия спекшихся комков. Таким образом, на основе своего опыта, оператор может прогнозировать будущий ход процесса и осуществить операции по его регулированию. При экспертной оценке мнения оперативного персонала установлено, что желательно производить измерение температуры в середине длины барабана, так как предположительно, в этой области находится зона «сваривания» обогащенного карналлита. Наблюдение температуры середины барабана позволило бы оператору своевременно установить момент «сваривания» карналлита (по резкому повышению температуры) и предпринять соответствующие действия. Однако реализовать измерение температуры в середине длины внутри барабана технически затруднительно.

Технологический процесс производства обезвоженного карналлита во вращающихся печах представляет собой непрерывный процесс, протекающий при условно постоянных регламентных значениях технологических параметров. При нормальном режиме протекания

технологического процесса в печи и постоянной загрузке основными контролируемыми параметрами с соответствующими пределами изменения являются:

- температура входящих газов в смесительной камере (590–610 °С);
- температура выходящих газов в пылевой камере (115–130 °С);
- давление воздуха первичного дутья (1,35–1,65 кгс/см<sup>2</sup>);
- давление воздуха вторичного дутья (0,95–1,15 кгс/см<sup>2</sup>);
- разряжение (10–11 мм вод. ст.).

Сменный оператор также визуально контролирует обезвоженный карналлит на выходе из печи.

Таким образом, регламентирован фактически один установившийся режим ведения технологического процесса производства обезвоженного карналлита во вращающейся печи – нормальный режим. Управление печью в нормальном режиме протекания технологического процесса заключается в соблюдении его сменным оператором.

Существует ряд факторов, при изменении которых нормальный режим ведения технологического процесса производства обезвоженного карналлита во вращающейся печи может быть нарушен. Возникает необходимость осуществления управляющих воздействий для возврата технологического процесса в нормальный режим. Описание этих факторов и способов учета их при управлении процессом получено путем интервьюирования сменных операторов вращающейся печи.

**Фактор 1 – источник подачи сырья в печь.** Подача сырья (обогащенного карналлита) в печь может осуществляться от двух источников: с конвейера и со склада (из кучи). Изменение источника подачи сырья происходит один раз в сутки. Днем сырье подается обычно с конвейера, а ночью – со склада. Воздействие этого фактора на технологический процесс объясняется разным качеством сырья от разных источников, точнее, разным содержанием влаги в сырье. Поскольку склад находится под открытым небом, то на сырье воздействуют осадки, и оно становится более влажным, чем сырье, поступающее по конвейеру. Таким образом, при изменении источника подачи сырья имеет место переходный процесс в технологическом режиме печи.

Поскольку оператор заранее осведомлен о переходе с одного источника сырья на другой, то он имеет возможность заблаговременно выполнить операции, направленные на поддержание технологического процесса в рамках нормального режима.

При изменении подачи сырья с конвейера на склад из-за повышения влажности подаваемого обогащенного карналлита снижается

температура в пылевой камере. В этом случае возможны следующие управляющие воздействия: увеличение задания регулятору температуры в смесительной камере, увеличение задания регулятору вторичного дутья (увеличение объема воздуха в пространстве печи), снижение количества подаваемого сырья (загрузки печи) без изменения заданий регулятору температуры и регулятору вторичного дутья.

При изменении подачи сырья со склада на конвейер снижается влажность подаваемого обогащенного карналлита и увеличивается температура в пылевой камере. В этом случае управляющие воздействия заключаются в уменьшении задания регулятору температуры в смесительной камере, уменьшении объема воздуха, подаваемого в пространство печи.

**Фактор 2 – включение хлоратора.** В нормальном режиме работы вращающейся печи первичный и вторичный воздух подаются в печь из боровов хлорсодержащих газов, которые образуются от работы хлоратора. Включение нагрева хлоратора происходит периодически с целью поддержания температуры в хлораторе в диапазоне 700–800 °С. Как только температура в хлораторе снижается до 700 °С, включают нагрев и доводят температуру до 800 °С. Затем выключают нагрев и ожидают, пока температура не снизится. Таким образом, после включения нагрева хлоратора через некоторое время (около 15 мин) температура хлорсодержащих газов в боровых резко повышается, что приводит к резкому повышению температуры первичного и вторичного воздуха. Как следствие, происходит скачкообразное увеличение температуры в смесительной камере на 10–15 °С, что свидетельствует о выходе технологического процесса из нормального режима.

В этом случае необходимо выполнить следующие операции управления: уменьшить задания регулятору температуры в смесительной камере на определенное время (около 30 мин), с последующим возвратом к предыдущему заданию.

**Фактор 3 – температура в пылевой камере.** При нормальном режиме работы вращающейся печи значение температуры в пылевой камере находится в диапазоне 115–130 °С и не должно изменяться без участия сменного оператора. Но практика показывает, что иногда может происходить внезапное изменение температуры в пылевой камере в сторону увеличения. Значительное (на 10 %) увеличение температуры в пылевой камере происходит без видимых изменений остальных технологических параметров вращающейся печи. Например, температура в пылевой камере в течение короткого промежутка времени

(20 мин) увеличилась с 120 до 130 °С. В таком случае принято говорить об эффекте сваривания (спекания) обогащенного карналлита в полости вращающейся печи, что может привести к налипанию карналлита на стенки и полки печи и полной остановке вращающейся печи на ремонт. Причина возникновения такого эффекта не выявлена и со слов операторов может быть вызвана изменением качества сырья.

При внезапном увеличении температуры в пылевой камере (на 10 % за 20 мин) необходимо выполнение следующих операций управления: уменьшить задание регулятору температуры в смесительной камере, уменьшить задание регулятору вторичного дутья (уменьшить объем воздуха, подаваемого в пространство печи).

**Фактор 4 – запыление горелочных устройств.** Подача первичного воздуха на горелочные устройства производится из боровов и сопровождается наличием карналлитовой пыли, что в свою очередь приводит к постепенному оседанию пыли на выкиде горелочных устройств. В условиях высокой температуры в топке карналлитовая пыль плавится и застывает на краях горелочного устройства, уменьшая тем самым пропускную способность горелки для прохождения природного газа и первичного воздуха. Как следствие, происходит уменьшение условного диаметра выходного отверстия устройства, пропадает возможность регулирования расхода первичного дутья, повышается давление первичного воздуха на входе в горелочное устройство. Все это во взаимосвязи приводит к тому, что возникает необходимость снижать нагрузку на вращающуюся печь путем уменьшения подачи сырья, а в случае критического засорения горелочных устройств возникает необходимость остановки и чистки их.

Со слов операторов чистка горелочных устройств во время работы печи возможна путем механического воздействия на устройства «аккуратными» ударами. По факту, нормальная чистка возможна лишь после остановки технологического процесса и охлаждения топки печи.

Судить о чистоте горелочного устройства можно по давлению первичного воздуха, подаваемого на устройство. При повышении давления первичного воздуха на 10 % и неизменном соотношении газ/воздух можно уже говорить о критической степени загрязнения горелочного устройства. В этом случае управляющее воздействие должно быть направлено на поддержание температурного режима печи путем незначительного уменьшения задания регулятору вторичного дутья (уменьшение объема воздуха, подаваемого в пространство печи).

**Фактор 5 – визуальный контроль.** Сменные операторы имеют возможность производить визуальный контроль продукта на выходе из

вращающейся печи. Такой контроль позволяет косвенно судить о качестве протекания технологического процесса обезвоживания карналлита. Со слов операторов можно выделить пять оценочных состояний продукта:

- 1) очень хорошо (пыль мелкая рассыпчатая);
- 2) хорошо (пыль мелкая и маленький окатыш, рассыпчатые);
- 3) удовлетворительно (пыль мелкая, маленький и крупный окатыш, рассыпчатые);
- 4) плохо (пыль мелкая нерассыпчатая творожистая);
- 5) очень плохо (пыль, мелкий и крупный окатыш, комки, нерассыпчатые творожистые).

Ухудшение качества состояния продукта чаще всего вызвано наличием избытка влаги в барабане вращающейся печи. Причиной появления избыточной влаги, очевидно, является качество сырья, подаваемого на обезвоживание.

Таким образом, сменному оператору, который своевременно осуществил визуальный контроль и обнаружил ухудшения в оценочных состояниях продукта, необходимо увеличить объем газовой смеси в барабане вращающейся печи, чтобы удалить избыточную влагу и вернуть оценочные состояния продукта в норму.

В этом случае необходимо выполнить следующую управляющую операцию: увеличить задание регулятору температуры в смесительной камере с одновременным незначительным увеличением задания регулятору вторичного дутья.

**Фактор 6 – нагрузка по сырью.** При нормальном режиме работы вращающейся печи загрузка обогащенного карналлита (нагрузка по сырью) оперативно не регулируется и устанавливается постоянной в пределах нормы, определяемой плановым отделом предприятия, исходя из потребности в выпуске продукции. Но сменный оператор в любой момент может изменить нагрузку по сырью в случае, если это позволит стабилизировать технологический процесс либо уменьшить воздействие внешних возмущений на протекание технологического процесса. Изменение нагрузки по сырью производится сменным оператором посредством увеличения/уменьшения высоты слоя обогащенного карналлита на скребковом конвейере (питателе) системы загрузки. Высота слоя выставляется поднятием/опусканием металлической пластины над скребковым конвейером и измеряется в сантиметрах.

Со слов сменных операторов чаще всего изменение нагрузки по сырью производят при смене источников подачи сырья (конвейер и склад). Обычно при переходе на складское сырье нагрузку уменьшают

на 3–4 см высоты слоя на питателе, т.е. на 1,2 т/ч. Максимальная нагрузка по сырью соответствует 16 см слоя, что составляет 6,4 т/ч. При нормальном режиме работы вращающейся печи нагрузка по сырью обычно 14–15 см слоя, что составляет 5,6–6,0 т/ч.

В случае уменьшения нагрузки по сырью необходимо уменьшить задания регулятору температуры в смесительной камере и в случае увеличения нагрузки увеличить задание регулятору температуры в смесительной камере.

Таким образом, по информации, полученной при интервьюировании сменных операторов, выделено шесть основных факторов, наличие которых может нарушить нормальный режим ведения технологического процесса производства обезвоженного карналлита во вращающейся печи, и два управляющих воздействия для возврата технологического процесса в нормальный режим. Экспертные данные приведены в таблице.

Экспертные данные

№ п/п	Наименование фактора	Технологическая особенность	Управляющее воздействие
F1	Источник подачи сырья в печь	Вводится вручную	Увеличение/уменьшение задания на регулятор температуры в смесительной камере. Увеличение/уменьшение задания на регулятор вторичного дутья
F2	Включение хлоратора	Вводится вручную	Увеличение/уменьшение задания на регулятор температуры в смесительной камере
F3	Температура в пылевой камере	Вводится вручную	Увеличение/уменьшение задания на регулятор температуры в смесительной камере. Увеличение/уменьшение задания на регулятор вторичного дутья
F4	Запыление горелочных устройств	Давление воздуха первичного дутья	Увеличение/уменьшение задания на регулятор вторичного дутья
F5	Визуальный контроль	Вводится вручную	Увеличение/уменьшение задания на регулятор температуры в смесительной камере. Увеличение/уменьшение задания на регулятор вторичного дутья
F6	Нагрузка по сырью	Положение пластины в скребковом конвейере. Вводится вручную	Увеличение/уменьшение задания на регулятор температуры в смесительной камере

Выполненные в работе исследования показывают, что для эффективного автоматизированного управления производством обезвоживания карналлита во вращающейся барабанной печи необходимо учитывать решения, принимаемые операторами-технологами, и соответствующие действия по управлению, не поддающиеся описанию формальными аналитическими зависимостями (моделями). Анализ особенностей стадии обезвоживания позволяет сделать вывод о том, что для оперативного управления процессом следует использовать концепцию интеллектуальной автоматизированной системы, построенной на основе продукционных моделей представления знаний, отражающих в том числе опыт квалифицированных операторов-технологов.

### **Список литературы**

1. *Металлургия черных и цветных металлов: учеб. для вузов / Е.В. Челищев [и др.]*. – М.: *Металлургия*, 1993. – 447 с.
2. *Древицкий Е.Г. Повышение эффективности работы вращающихся печей*. – М.: *Стройиздат*, 1990. – 224 с.
3. *Монастырев А.В. Производство извести*. – М.: *Высшая школа*, 1971. – 272 с.
4. *Онацкий С.П. Производство керамзита*. – М.: *Стройиздат*, 1971. – 312 с.
5. *Лисиенко В.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: справ.: в 2 кн. – Кн. 1*. – М.: *Теплотехник*, 2004. – 688 с.
6. *Лисиенко В.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: справ.: в 2 кн. – Кн. 2*. – М.: *Теплотехник*, 2004. – 592 с.
7. *Салихов З.Г., Бекаревич А.А. Компьютерная система автоматического управления процессами обжига материалов в трубчатых вращающихся печах // Цветные металлы*. – 2003. – № 5. – С. 89–91.
8. Пат. 2232959 Рос. Федерация, МПК F27B7/42, F27D19/00. Система управления процессом обжига материала во вращающейся печи/Салихов З.Г., Шубин В.И., Бекаревич А.А., Салихов К.З. – № 2002102511/02, заявл. 01.02.2002; опубл. 10.03.2005.
9. *Шубин М.В. Автоматическая система предупреждения аварий (разрушения огнеупорной футеровки) мощных вращающихся печей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06*. – М., 2010. – 28 с.
10. *Гельфанд Я.Е. Управление цементным производством с использованием вычислительной техники*. – Л.: *Стройиздат*, 1973. – 178 с.
11. *Бажанов А.Г. Управление вращающейся печью для обжига цементного клинкера на основе нечетких диаграмм поведения ее узлов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / БГТУ им. В.Г. Шухова*. – Белгород, 2013. – 20 с.

12. Салихов З.Г. Разработка бесконтактного метода автоматического контроля температуры обжигаемого материала по всей длине вращающейся печи // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 2002. – № 6. – С. 67–73.

13. Салихов З.Г. Алгоритм расчета установок регуляторов стабилизации температурного профиля обжигаемого материала в функции длины корпуса вращающейся печи // Цветные металлы. – 2003. – № 3. – С. 92–96.

14. Юдин Д.А. Автоматизированная система управления вращающимися печами с применением технического зрения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2014. – 19 с.

15. Шатилов О., Чепланов А., Чуйков С. Автоматизированная система контроля и регулирования вращающихся печей // Современные технологии автоматизации. – 2002. – № 3. – С. 20–27.

16. Беккер В.Ф. Решение технологических проблем действующего производства средствами автоматизации: моногр.: в 2 т. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – Т. 2. – 176 с.

### References

1. Chelishchev E.V et al. Metallurgii chernykh i tsvetnykh metallov [Metallurgy of ferrous and non-ferrous metals]. Moscow, Metallurgii, 1993, 447 p.

2. Drevitskii E.G. Povyshenie effektivnosti raboty vrashchائيushchikh sia pechei [Improving the efficiency of rotary kilns]. Moscow, Stroiizdat, 1990, 224 p.

3. Monastyrev A.V. Proizvodstvo izvesti [Lime production]. Moscow, Vysshaya shkola, 1971, 272 p.

4. Onatskii S.P. Proizvodstvo keramzita [Production of expanded clay]. Moscow, Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, 1971, 312 p.

5. Lisienko V.G. Vrashchائيushchiesia pechi: teplotekhnika, upravlenie i ekologiya. Chast 1. [Rotary kiln: thermal engineering, management and ecology. Part 1]. Moscow, Teplotekhnika, 2004, 688 p.

6. Lisienko V.G. Vrashchائيushchiesia pechi: teplotekhnika, upravlenie i ekologiya. Chast 2. [Rotary kiln: thermal engineering, management and ecology. Part 2]. Moscow, Teplotekhnika, 2004, 592 p.

7. Salikhov Z.G., Bekarevich A.A. Komp'uternaia sistema avtomaticheskogo upravleniia protsessami obzhiga materialov v trubchatykh vrashchائيushchikh sia pechakh [Computer system of automatic control of firing processes in tubular rotary kilns]. *Nauchno-tekhnicheskii zhurnal «Tsvetnye metally»*, no. 5, 2003, pp. 89-91.

8. Salikhov Z.G., Shubin V.I., Bekarevich A.A., Salikhov K.Z. Sistema upravleniia protsessom obzhiga materiala vo vrashchائيushchiesia pechi [Control system of the material firing process in a rotary kiln]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2002102511/02, (2005).

9. Shubin M.V. Avtomaticheskaya sistema uprezhdeniia avarii (razrusheniia ogneupornoii futerovki) moshchnykh vrashchائيushchikh sia pechei [Automatic system of accident prevention (destruction of refractory lining) of powerful rotary kilns]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 2010, 28 p.



10. Gel'fand Ia.E. Upravlenie tsementnym proizvodstvom s ispol'zovaniem vychislitel'noi tekhniki [Management of cement production with the use of computers]. Leningrad, Stroiizdat, 1973, 178 p.

11. Bazhanov A.G. Upravlenie vrashchaiushcheisia pech'iu dlia obzhiga tsementnogo klinkera na osnove nechetkikh diagramm povedeniia ee uzlov [Control of the rotating kiln for firing cement clinker based on fuzzy diagrams of the behavior of its nodes]. Abstract of Ph. D. thesis. Belgorod, 2013, 20 p.

12. Salikhov Z.G. Razrabotka beskonnaktalnogo metoda avtomaticheskogo kontrolya temperatury obzhigaemogo materiala po vsei dline vrashchaiushcheisia pechi [Development of non-contact method of automatic temperature control of the fired material along the entire length of the rotary kiln]. *Izvestiia Vuzov. Ser. Tsvetnaia metallurgiya*, 2002, no. 6, pp. 67-73.

13. Salikhov Z.G. Algoritm rascheta ustanovok regulatorov stabilizatsii temperaturnogo profilya obzhigaemogo materiala v funktsii dliny korpusa vrashchaiushcheisia pechi [Algorithm of calculation of the regulators of stabilization of the temperature profile of the fired material in the function of the length of the rotary kiln body]. *Tsvetnye metally*, 2003, no. 3, pp. 92-96.

14. Iudin D.A. Avtomatizirovannaia sistema upravleniia vrashchaiushchimisia pechami s primeneniem tekhnicheskogo zreniia [Automated control system of rotary kilns with the use of technical vision]. Abstract of Ph. D. thesis. Belgorod, 2014, 19 p.

15. Shatilov O., Cheplanov A., Chuikov S. Avtomatizirovannaia sistema kontrolya i regulirovaniia vrashchaiushchikhsia pechei [Automated control and regulation system of rotary kilns]. *Zhurnal «Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii»*, no. 3, 2002, pp. 20-27.

16. Bekker V.F. Reshenie tekhnologicheskikh problem deistvuiushchego proizvodstva sredstvami avtomatizatsii. T. 2: proizvodstvo gubchatogo titana [Solution of technological problems of the existing production by means of automation. Vol. 2: production of titanium sponge]. Perm, Izd-vo Perm. nats. issled. politekhn. un-ta, 2015, 176 p.

Получено 05.07.2018

### **Об авторах**

**Шумихин Александр Георгиевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: shumichin@gmail.com).

**Кондрашов Сергей Николаевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: Sergej.Kondrashov@pnos.lukoil.com).

**Малышенко Антон Викторович** (Пермь, Россия) – коммерческий директор ООО «Ин-Верро» (614064, г. Пермь, ул. Героев Хасана, 41, e-mail: inverro@perm.ru).

### **About the authors**

**Alexandr G. Shumikhin** (Perm, Russian Federation) – Doctor in Technical Sciences, Professor, Head of Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: shumichin@gmail.com).

**Sergej N. Kondrashov** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: Sergej.Kondrashov@pnos.lukoil.com).

**Anton V. Malysenko** (Perm, Russian Federation) – Commercial Director LLC ‘In-Verro’ (41, Geroev Khasana str., Perm, 614064, e-mail: inverro@perm.ru).