

Д.В. Прутцков, вед. научный сотрудник, д.х.н.

С.М. Лупинос, научный сотрудник

Н.П. Криворучко, зав. лабораторией⁽¹⁾

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХЛОРИРОВАНИЯ МАГНЕЗИТА СМЕСЬЮ ХЛОРА И ОКСИДА УГЛЕРОДА НА ПИЛОТНОЙ УСТАНОВКЕ

Государственный научно-исследовательский и проектный институт титана

Досліджено процес хлорування магнезиту газовою сумішшю хлору та оксиду вуглецю на пілотній установці. На шахтному реакторі хлорування із внутрішнім діаметром 0,3 м та висотою 2,0 м вивчено головні особливості технології й одержано техніко-економічні показники процесу. Досліджено склад одержуємого дихлориду магнію та побічних продуктів процесу. Встановлено високу ефективність технології порівняно з відомим процесом хлорування оксидної сировини у шахтних електропечах.

Исследован процесс хлорирования магнезита газовой смесью хлора и оксида углерода на пилотной установке. В шахтном реакторе хлорирования с внутренним диаметром 0,3 м и высотой 2,0 м изучены основные особенности технологии и получены технико-экономические показатели процесса. Исследован состав получаемого дихлорида магния и побочных продуктов процесса. Установлена высокая эффективность технологии в сравнении с известным процессом хлорирования оксидного сырья в шахтных электропечах.

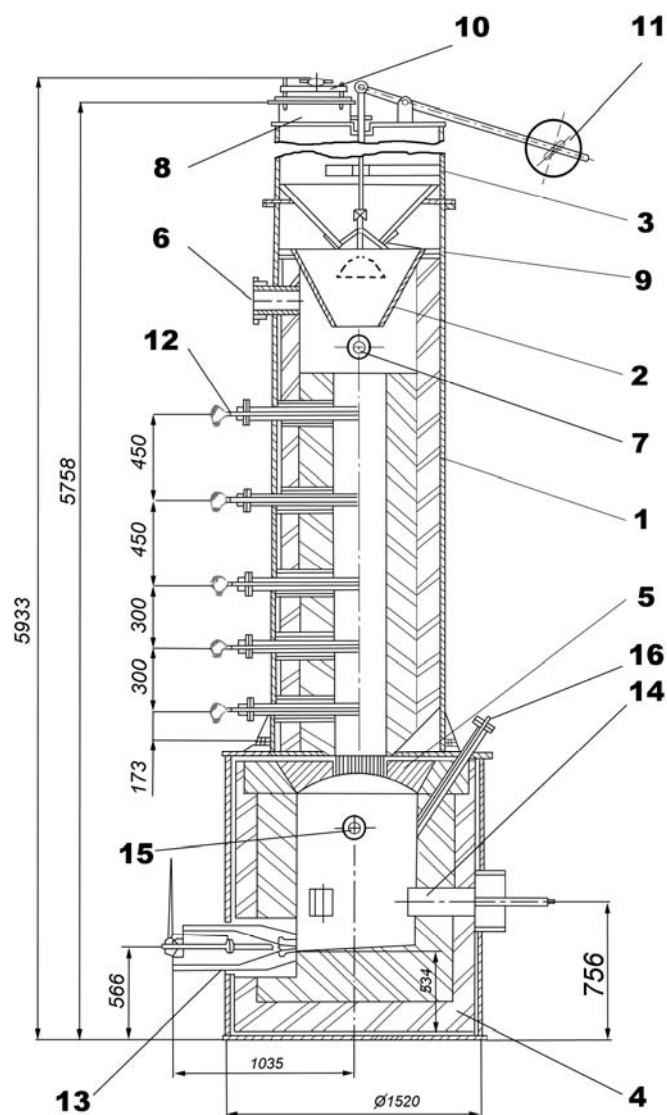
Введение. Ранее [1,2] нами были исследованы закономерности процесса хлорирования магнезита смесью хлора и оксида углерода на лабораторной и крупнолабораторной установках. Было установлено, что взаимодействие магнезита с газовой фазой начинается после его диссоциации, а кинетические параметры процесса хлорирования в стационарном режиме определяются закономерностями молекулярной диффузии реагентов через пленку жидкого хлорида магния.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является разработка и испытание основных аппаратов и технологических режимов процесса в более приближенном к промышленному масштабе на базе пилотной установки.

Основная часть исследований. Основными аппаратами установки являются реактор для хлорирования магнезита газовой смесью хлора и оксида углерода и газогенератор, в котором из кислорода и восстановителя синтезируют оксид углерода. Установка также содержит пылевую камеру и рукавный фильтр для очистки отходящих из реактора технологических газов и аппарат их дожигания, пылевую камеру и теплообменник для очистки и охлаждения оксида углерода (генераторного газа). В состав установки входят вентиляторы высокого давления, обеспечивающие движение технологических газов, газовые коммуникации, связывающие аппараты установки, контрольно-измерительная, регулирующая и запорная арматура для управления технологическим процессом, а также системы промышленного и сантехнического отсосов и газоочистки.

Реактор хлорирования магнезита (рис. 1) представляет собой стальной цилиндрический аппарат, футерованный внутри шамотом. В вертикальной шахте (1) с внутренним диаметром 0,3 м протекают основные физико-химические процессы хлорирования. На шахту установлен загрузочный бункер магнезита (3), а сама шахта установлена на цилиндрический копильник расплава (4). Рабочее пространство шахты от копильника отделено решеткой (5), через которую подают реакционные газы. Для фи-

льтрации образующегося расплава на решетку помещают слой графитовой насадки. Шахта оборудована газоотводным патрубком (6) и взрывным клапаном (7). Для выпуска расплава копильник оборудован леткой (13). Нагрев расплава в копильнике осуществляют двумя водоохлаждаемыми электродами (14). Хлор и оксид углерода подают в реактор через фурменный патрубок (15), расположенный в верхней части копильника. Для чистки реактора в шахте и копильнике имеются люки. Контроль температуры осуществляют при помощи термопар (12), располагаемых по высоте шахты и в объеме копильника. Для замера и сигнализации уровня расплава копильник оборудован уровнемерами верхнего и нижнего уровня расплава (16).



- 1 - шахта; 2 - конус; 3 - загрузочный бункер; 4 - копильник; 5 - решетка;
6 - газоотводный патрубок; 7 - взрывной клапан; 8 - люк; 9 - клапан; 10 - крышка;
11 - противовес; 12 - термопара; 13 - летка; 14 - электрод; 15 - фурма;
16 - уровнемер

Рисунок 1 – Реактор хлорирования магнезита

После изготовления, монтажа и испытания аппаратов и трубопроводов установки был осуществлен ее постадийный запуск, сопровождавшийся сушкой футеровки, загрузкой и разогревом аппаратов и выводом их на паспортный технологический режим.

Для испытаний использовали природный магнезит Саткинского месторожде-

ния фракции -30 +20 мм, массовая доля компонентов в котором составляла, %: $MgO - 46,7$; $CaO - 0,5$; $SiO_2 - 0,3$; $Al_2O_3 - 0,06$; $Fe_2O_3 - 0,22$. Для получения оксида углерода в газогенераторе использовали пековый кокс (ГОСТ 3213-71), содержание золы и летучих в котором не превышает 1%.

В освоенном стабильном режиме работы реактора процесс хлорирования характеризовался следующими особенностями.

Вскоре после начала подачи реакционных газов (через 30...40 минут), температура в шахте реактора стабилизировалась, образуя по высоте несколько температурных зон.

В нижней зоне, непосредственно над газораспределительной решеткой, температуру поддерживали в пределах 1153...1293 К. Очевидно, эта зона реактора и являлась зоной реакции, в которой протекали экзотермические процессы хлорирования обожженного магнезита. Высота реакционной зоны составляла около 0,5...0,6 м.

Над реакционной зоной располагался слой магнезита, температура которого находилась в пределах 773...923 К. Судя по температурному интервалу, именно в этой зоне осуществлялся процесс термического разложения магнезита с использованием теплоты отходящих из зоны реакции газов.

Верхний слой магнезита имел температуру в пределах 403...773 К. В этой зоне происходит нагрев магнезита и удаление влаги, сохранявшейся в нем после сушки.

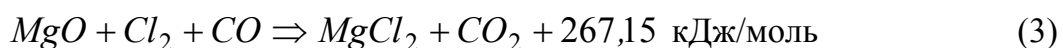
Таким образом, технологический цикл превращений, происходящих с отдельным кусочком магнезита, поступающим в реактор, имеет несколько стадий. В зоне нагрева происходит удаление остаточной влаги и, по мере опускания, постепенный разогрев кусочков шихты до температуры 773 К за счет теплоты противоточно движущегося потока отходящих газов. По достижении кусочками магнезита температуры выше 773 К (в зоне диссоциации) начинается процесс термического разложения магнезита по реакции



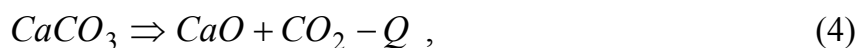
а также карбоната железа, в незначительном количестве содержащегося в исходном сырье,



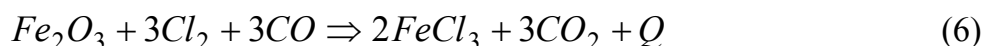
Свежеобожженные кусочки магнезита, обладающие развитой поверхностью и значительной газопроницаемостью, встречаясь с реакционными газами, вступают с ними в интенсивное взаимодействие по реакции

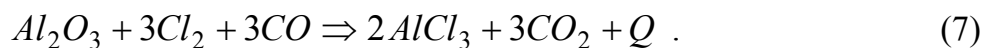


Из-за значительной экзотермичности процесса хлорирования в зоне реакции развивается температура до 1153...1293 К. Параллельно с указанным взаимодействием протекают процессы диссоциации примесного карбоната кальция



а также хлорирования оксидных примесей кальция, железа и алюминия, присутствующих в обожженном магнезите,





Образующийся хлорид магния ($T_{\text{плавл}} = 987 \text{ K}$), вследствие высокой температуры в реакционной зоне, в жидком виде стекает по кусочкам хлорируемой шихты через слой графитовой насадки в копильник реактора. Анализы получаемого расплава показали, что основная часть хлорида кальция также ассимилируется расплавом. Образующиеся летучие хлориды $FeCl_3$ ($T_{\text{кип}} = 588 \text{ K}$) и $AlCl_3$ ($T_{\text{возг}} = 453 \text{ K}$), как показывают результаты исследования состава получаемых продуктов процесса, в основном удаляются из зоны реакции с отходящими газами.

По мере опускания кусочка магнезита в зоне реакции происходит его хлорирование и уменьшение вплоть до микроскопических размеров. Мелкодисперсные частицы оксида магния, в основном, задерживаются на слое графитовой насадки, лишь частично попадая в копильник со стекающим расплавом. За счет вырабатывания магнезита в зоне реакции происходит постоянная усадка шихты, и осуществляется ее движение по шахте в вертикальном направлении вниз.

Как известно, в хлорной металлургии степень использования хлора и скорость процесса хлорирования являются важнейшими технологическими показателями, определяющими, в конечном итоге, экономичность процесса и производительность аппарата. Поэтому для определения указанных показателей и факторов, влияющих на них, а также для обоснования оптимального технологического режима работы реактора на пилотной установке, осуществляли ряд экспериментов по определению кинетических закономерностей процесса. Другим побудительным мотивом была проверка кинетических зависимостей, полученных ранее на лабораторной и крупнолабораторной установках [3].

Методика экспериментов состояла в следующем. В установившемся режиме работы реактора по движению и хлорированию шихты, а также температурам в зонах реактора при помощи газовых ротаметров устанавливали расходы хлора и оксида углерода, соответствующие определенному соотношению P_{CO}/P_{Cl_2} и требуемой скорости газового потока. Скорость реакционных газов рассчитывали на свободное сечение шахты реактора и нормальные условия. После выхода процесса на стационарный режим (через 20...30 минут) отбирали пробы отходящих из реакторов газов, в которых фиксировали содержание хлора. После дублированного отбора проб осуществляли переход в другой кинетический режим, что достигалось варьированием режима подачи реакционных газов. По разности объемной доли хлора в подаваемых реакционных и отходящих из реактора газах рассчитывали степень усвоения хлора и соответствующую ей скорость процесса хлорирования.

Полученные кинетические зависимости представлены графически на рис. 2-4.

Как следует из графика рис. 2, степень усвоения хлора существенно зависит от скорости подачи реакционных газов. При данных условиях эксперимента ($P_{CO}/P_{Cl_2} = 2,3$; температура в реакционной зоне 1163...1293 K и высота реакционной зоны ~0,55 м) почти полное усвоение хлора (98,6%) наблюдали при скорости реакционных газов $3,88 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$. Увеличение скорости газового потока до значения порядка $7 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$ приводит к плавному понижению усвоения хлора до 95,8%. Дальнейший рост скорости до $17 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$ сопровождается более резким падением использования реагента (до 62,3%).

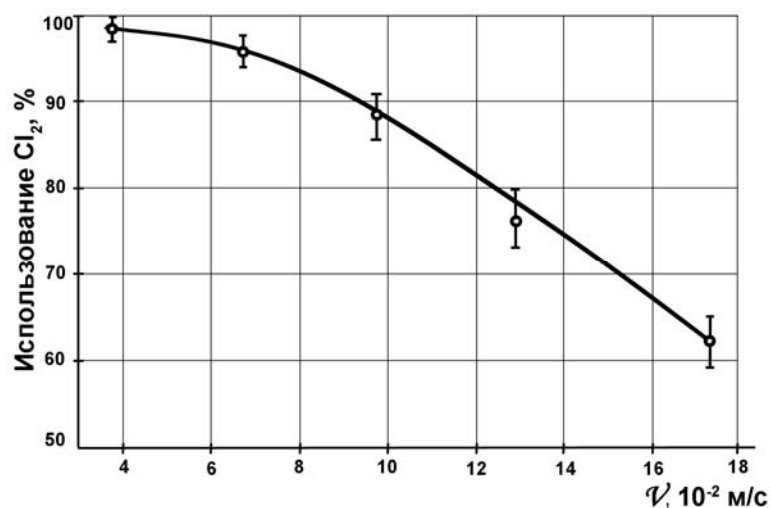


Рисунок 2 – Зависимость степени использования хлора от скорости подачи реакционных газов

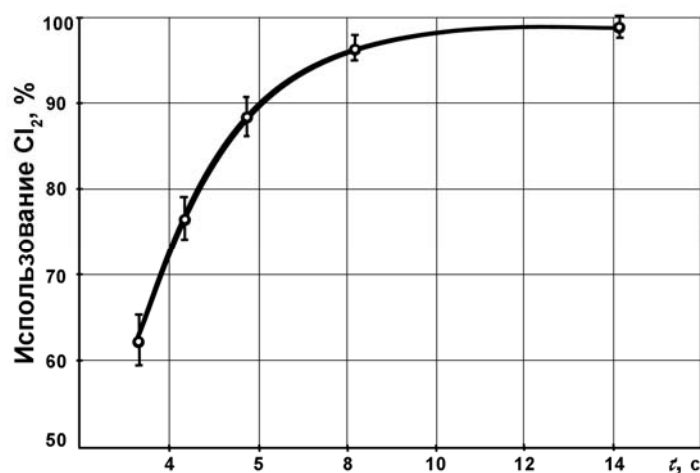
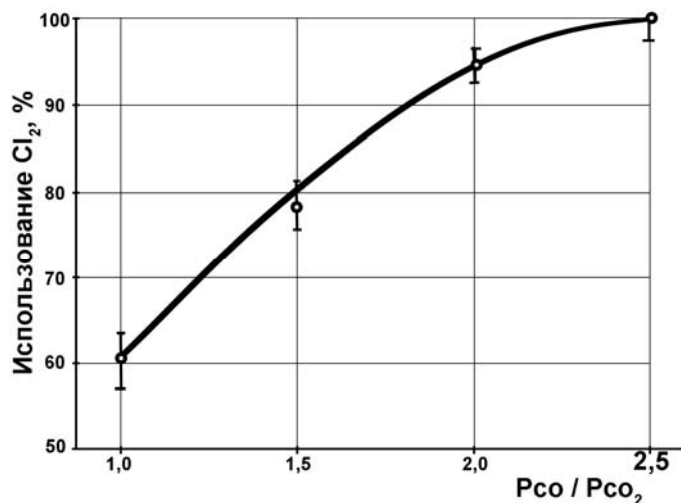


Рисунок 3 – Зависимость степени использования хлора от времени контакта газов с реакционной зоной τ

Интерпретация полученных данных в зависимости от времени контакта реакционных газов со слоем магнезита в зоне реакции (рис. 3) показывает, что при содержании в реакционных газах $P_{\text{Co}}/P_{\text{Cl}_2} = 2,3$ максимальное поглощение хлора (95,8...98,6%) достигается при времени контакта хлорирующей смеси с реакционным слоем магнезита равном 8...14 с. Сокращение этого времени приводит к возрастанию проскока хлора. Эта зависимость удовлетворительно согласуется с результатами, полученными на крупнолабораторной установке [2]. Достигнутая в данном эксперименте несколько более низкая степень усвоения хлора при равном времени контакта, по сравнению с работой [2], очевидно, обусловлена использованием более крупной фракции хлорируемого магнезита, что уменьшило границу раздела фаз для диффундирующих реагентов, а также возможной погрешностью в определении высоты реакционной зоны и большим градиентом температуры в ней.

Зависимость степени использования хлора от соотношения парциальных давлений газовых реагентов (рис. 4) получена при скорости газового потока $12,95 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$ (суммарный объем реакционных газов – $33 \text{ нм}^3/\text{ч}$). Как видно, полученные резуль-

таты довольно успешно корреспондируются с установленной ранее зависимостью [1,2]. Увеличение объемной доли оксида углерода в газовой фазе приводит к возрастанию усвоения хлора, а при соотношении $P_{CO}/P_{Cl_2} = 2,5$ в газах, отходящих из реактора, хлор отсутствует. Поэтому соотношение $P_{CO}/P_{Cl_2} = 2,3$ в реакционных газах рекомендовано в качестве рабочего значения при эксплуатации пилотной установки.



*Высота реакционного слоя 1,0 м;
 скорость газового потока $12,95 \cdot 10^{-2}$ м/с;
 температура в зоне реакции 1153...1313 К*

Рисунок 4 – Зависимость степени использования хлора от соотношения парциальных давлений газовых реагентов P_{CO}/P_{Cl_2}

Для устойчивого ведения процесса хлорирования при соотношении в реакционных газах $P_{CO}/P_{Cl_2} = 2,3$ и высоте реакционной зоны $\sim 0,55 \dots 0,60$ м была принята скорость подачи хлора $6,78 \cdot 10^{-2}$ м/с. При этом достигается практически полное усвоение хлора и соответствующая ему удельная производительность аппарата равна:

$$5,0 \cdot 0,958 \cdot 95,3 : 22,4 \cdot 24 : 0,07065 = 6,92 \text{ т } MgCl_2 / (м^2 / \text{сутки}),$$

где 0,07065 – площадь сечения реакционной зоны реактора, $м^2$.

Достигнутая удельная производительность при переходе на промышленный аппарат с внутренним диаметром 3,0 м и сохранением высоты зоны реакции позволит получать 69,2 т расплава хлорида магния в сутки. Увеличение высоты реакционной зоны приведет к пропорциональному росту производительности аппарата и при высоте реакционной зоны 1,0 м (при соответствующем повышении газовой нагрузки) производительность промышленного аппарата составит 115,3 т по дихлориду магния в сутки.

Дальнейшее повышение скорости газового потока, хотя и приводит к возрастанию производительности, однако на данной установке экономически и технологически нецелесообразно с точки зрения увеличения потерь хлора. Также увеличение расхода реакционных газов и нагрузки по хлору в ходе эксперимента приводили к росту высоты зоны реакции до $\sim 1,0$ м и превышению оптимального температурного режима. Увеличение скорости движения реакционных газов изменяет условия теплопереноса в зонах нагрева и диссоциации, что, в конечном итоге, обуславливает расстройство теплового баланса в шахте, дестабилизацию процессов диссоциации и нагрева магнезита и затухание процесса хлорирования. Таким образом, увеличение высоты зоны реакции в более производительных аппаратах должно сопровождаться соответ-

ствующим ростом высоты верхних зон и существенным увеличением слоя магнезита в шахте аппарата.

Учитывая, что в реальных условиях магниевого производства основным хлорирующим агентом является анодный хлоргаз, объемная доля хлора в котором до настоящего времени не превышает 92%, были проведены эксперименты по имитации использования для ведения процесса анодного хлора. Полученные результаты показали, что уменьшение доли хлора в подаваемом хлоргазе ведет к некоторому снижению степени его использования в реакторе. Это, очевидно, объясняется тем, что подаваемый в фурму в составе воздуха кислород в условиях работы реактора вступает во взаимодействие с оксидом углерода по реакции:



что способствует понижению парциального давления оксида углерода и соотношения P_{CO}/P_{Cl_2} в газовой фазе, изменению диффузионных потоков реагентов, и в итоге приводит к менее полному усвоению хлора. Другой механизм влияния заключается в том, что азот, составляющий основную долю воздуха, является балластом в реакционных газах. Его введение ухудшает условия диффузии реакционных газов к поверхности магнезита [1,2], что также приводит к торможению процесса хлорирования.

Отработанный оптимальный режим эксплуатации реактора достигали при подаче 5 нм³/ч хлора и 11,5 нм³/ч оксида углерода ($P_{CO}/P_{Cl_2} = 2,3$), что обеспечивало высокую степень усвоения хлора. При этом давление на фурме поддерживали в пределах 4,90...9,80 кПа, давление отходящих газов на выходе из реактора составляло от +0,98 до -0,98 кПа при разрежении в аппарате дожигания технологических газов равном 1,96...5,88 Па.

Указанному газовому режиму соответствовал график загрузки магнезита порциями примерно по 75 кг через 4 ч и слива расплава из копильника дважды в сутки (до 250 кг).

В процессе эксплуатации реактора периодически возникали следующие нарушения нормального течения технологического процесса. При нарушении температурного режима зона реакции перемещалась вверх по шахте, ухудшая оседание и сход шихты. Это потребовало уменьшить фракционный состав магнезита до крупности 10...20 мм и ввести операцию шуровки шихты в шахте. Также периодически возрастало давление на фурме до 19,60...24,52 кПа, что сопровождалось падением расхода реакционных газов. Причиной этого, в основном, являлось зарастание возгонами патрубка отвода газов из реактора.

Качество получаемого расплава хлорида магния является одним из важнейших показателей, характеризующих эффективность разрабатываемой технологии.

Массовая доля компонентов получаемого в реакторе расплава дихлорида магния за период испытаний составляла, %: $MgCl_2$ – 97,0...98,8; $CaCl_2$ – 0,7...1,2; MgO – 0,3...0,6; SiO_2 – 0,008...0,04; $Fe_{об}$ – 0,001...0,006; Al – 0,001...0,004; $SO_4 < 0,02$. По содержанию основных примесей получаемый продукт полностью удовлетворяет требованиям электролитического передела. Содержание в нем хлорида кальция во все периоды испытаний не превышало 2,0%. Это позволяет полагать, что наличие хлорида кальция не приведет к слишком быстрому накоплению его в рабочем электролите и не потребует более частой корректировки состава электролита.

Массовая доля MgO в расплаве, очевидно, может быть несколько снижена путем увеличения высоты слоя графитовой насадки, что будет способствовать лучшей фильтрации расплава и поглощению взвешенных частичек непрохлорированного ма-

гнезита.

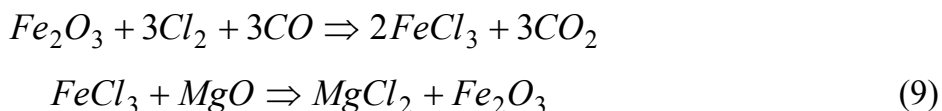
Учитывая зависимость показателей электролиза от дисперсного состава присутствующего в расплаве оксида магния, были проведены микроскопические исследования проб расплава. Из материала проб были приготовлены иммерсионные препараты и изучены под поляризационным микроскопом МИН-8 в проходящем свете при увеличении 45...600х. Результаты исследования показали, что частицы оксида магния, содержащиеся в расплаве, представляют собой полидисперсную систему, основную массу которой составляют частицы крупностью +30..-150 мкм. В расплаве также обнаружена незначительная часть конгломератовидных сростков крупностью до 200...250 мкм, что, вероятно, является следствием агрегации частиц [4]. Сравнение гранулометрического состава оксида магния с размерами частиц оксида в расплаве безводного карналлита [3] показывает, что электролитическая переработка расплава, полученного на экспериментальной установке, не вызывает каких-либо затруднений.

Процесс накопления непрохлорированного остатка является наиболее негативным фактором в организации производства безводного хлорида магния в шахтных электропечах (ШЭП). Он приводит к дестабилизации технологического режима процесса хлорирования и, в конечном итоге, определяет продолжительность кампании эксплуатации аппарата [5].

Однако при хлорировании магнезита в присутствии оксида углерода шлакообразование выражено менее остро, чем для технологии хлорирования в присутствии твердого восстановителя. Прежде всего, это определяется использованием в процессе активного свежееобожженного оксида магния, образующегося непосредственно в реакторе, что способствует его более полному хлорированию. Кроме того, отсутствие в шихте твердого восстановителя, обладающего определенной зольностью, и связующего также сокращает поступление шлакообразующих компонентов.

Исследование химического и фазового состава образующегося непрохлорированного остатка позволяет выделить в нем два слоя: верхний слой, имеющий розовый оттенок, в котором массовая доля основных компонентов составляет, %: $MgCl_2$ – 50,0...55,0; MgO – 30,0...38,0; SiO_2 – 12,0...15,0; Fe_2O_3 – 1,4...1,8; нижний слой, более светлый, белого цвета, в котором массовая доля компонентов составляет, %: $MgCl_2$ – 32,0...40,0; MgO – 12,0...20,0; SiO_2 – 28,0...46,0; Fe_2O_3 – 0,1...0,3.

Сопоставление состава образующихся продуктов позволяет сделать следующие предположения о механизме шлакообразования. Основным шлакообразующим компонентом является α -кварц, присутствующий в магнезите и почти не подвергающийся хлорированию при температурах ниже 1273 К. По мере хлорирования магнезита и оседания слоя шихты на решетку происходит ее обеднение по содержанию MgO и накопление SiO_2 . При этом присутствующие в магнезите соединения железа, которые хлорируются быстрее, чем MgO , частично ассимилируются слоем шихты и, вероятно, принимают участие в окончательном дохлорировании магнезита через обменные реакции



Эти процессы, очевидно, протекают в объеме розового шлака. По мере дохлорирования магнезита содержание MgO уменьшается, хлорид железа, не встречая агента для реакции (9), возгоняется, а остающаяся на решетке белая пористая масса, очевидно, и представляет собой материал, в котором процессы хлорирования завершаются.

Кроме α -кварца, в составе белого шлака обнаружены незначительные количества форстерита $2MgO \cdot SiO_2$ и шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$, процессы образования которых начинаются при температурах, близких к 1273 К [6,7].

Скорость накопления шлака зависит от производительности реактора и при нагрузке по хлору $5 \text{ нм}^3/\text{ч}$ составляет около 5 кг/сутки.

По своим механическим свойствам шлак не отличается высокой механической прочностью и удаляется из шахты при помощи лома и скребков. Однако, сама по себе остановка реактора, его охлаждение, чистка и последующий разогрев шихты факелом фурмы-горелки приводили к снижению производительности аппарата. Это обстоятельство указывает на необходимость детальной проработки возможных вариантов механизации операции удаления шлака без охлаждения реактора и сокращения его простоев.

Выходящие из реактора газы имеют три основных источника образования. Прежде всего, это был избыточный оксид углерода, подававшийся в фурму для обеспечения условий диффузионной стехиометрии ($P_{CO}/P_{Cl_2} = 2,3$). Вторым источником является диоксид углерода, образовавшийся в зоне реакции в результате протекания процессов хлорирования по реакциям (3),(5)-(7). Третьим компонентом также служит диоксид углерода, выделявшийся в зоне диссоциации магнезита по реакциям (1), (2) и (4).

В отработанном режиме эксплуатации реактора объем отходящих газов составлял $16...18 \text{ нм}^3/\text{ч}$; их температура на выходе из реактора достигала 373...413 К. При этом объемная доля компонентов находилась в пределах, %: $CO_2 - 58,0...63,0$; $CO - 37,0...42,0$; $Cl_2 - 0...2,6$; $HCl - \text{до } 0,5$; $N_2 - \text{до } 0,8$. При соблюдении оптимального режима процесса проскоки хлора наблюдали лишь изредка.

Отходящие реакционные газы оказывают на процесс далеко не пассивное влияние. Они выполняли функцию теплоносителя, обеспечивая нагрев и диссоциацию магнезита, тем самым, определяя устойчивость работы аппарата. Вместе с отходящими газами из шахты выносилась пыль природного и менее прочного обожженного магнезита, а также имеющие высокую упругость паров хлориды железа, алюминия и магния, образующиеся в процессе хлорирования. По мере остывания отходящих газов происходила конденсация хлоридов, причем она начиналась уже в верхних слоях магнезита. Ввиду значительной скорости газового потока мелкодисперсные частицы хлоридов уносились с газами и осаждались в пылевой камере, рукавном фильтре, в трубопроводах. Массовая доля компонентов в уловленных возгонах составляла, %: $MgCl_2 - 82,0...87,0$; $FeCl_3 - 8,0...12,0$; $AlCl_3 - 3,0...6,0$; $MgO - 0,5...0,8$; $CaCl_2 - 0,3...0,7$; $SiO_2 - 0...0,1$. В освоенном режиме работы реактора выход пыли и возгонов достигал $14...16 \text{ кг/сутки}$, возрастая при увеличении газовой нагрузки.

Выполненные кинетические исследования процесса, однако, не отражают полный спектр показателей и факторов, позволяющих оценить эффективность разработанной технологии. В этой связи, для определения технико-экономических показателей процесса, было организовано составление его материального баланса.

Материальный баланс процесса хлорирования по магнию и хлору в относительном (процентном) выражении представлен в табл. 1 и 2. Некоторая невязка баланса, по-видимому, может быть обусловлена погрешностью химических анализов, а также использованием расплава обезвоженного карналлита в пусковой период.

Таблица 1 – Материальный баланс процесса хлорирования по магнию

Приход	%	Расход	%
с магнезитом	100,0	с получаемым расплавом	96,84
		– в виде $MgCl_2$	95,88
		– в виде MgO	0,96
		с возгонами	2,63
		– в виде $MgCl_2$	2,59
		– в виде MgO	0,04
		со шлаком	2,05
		– в виде $MgCl_2$	1,59
		– в виде MgO	0,66
Итого	100,0	Итого	101,52

Таблица 2 – Материальный баланс процесса хлорирования по хлору

Приход	%	Расход	%
с подаваемым хлором	100,0	с получаемым расплавом	95,47
– в виде MgO	100,0	– в виде $MgCl_2$	94,90
		с возгонами	2,75
		– в виде $MgCl_2$	2,37
		со шлаком	0,38
		с отходящими газами	1,20
		– в виде Cl_2	1,06
		– в виде HCl	0,14
Итого	100,0	Итого	99,78

Таблица 3 – Основные технико-экономические показатели процесса хлорирования магнезита (на 1 т расплава 100% $MgCl_2$)

Наименование	Хлорирование в ШЭП по старой технологии	Хлорирование в присутствии оксида углерода
Степень использования хлора, %	70...85	97...99
Степень извлечения магния в готовый продукт	75...90	94...96
Удельная производительность, т/(м ² ·сутки)	2,1...2,3	6,5...7,0
Удельный выход:		
- шлака, кг/т	30...50	10...14
- пыли и возгонов, кг/т	50...70	28...32
Удельные нормы расхода, т/т:		
- природного магнетита	шихта сложного состава	0,94...0,96
- хлора (100% Cl_2)	0,95...1,20	0,77...0,80
- оксида углерода	-	0,71...0,73
- электроэнергии, (кВт·ч)/т	400...500	350...400

На основании полученного материального баланса рассчитаны основные технико-экономические показатели процесса, приведенные в табл. 3. Анализ полученных результатов показывает, что, несмотря на высокую степень извлечения магния в гото-

вый продукт и использования хлора на хлорирование оксида магния, около 5% указанных компонентов теряется с побочными продуктами (отходами) процесса. При более строгой организации технологического процесса возможно некоторое снижение потерь магния и хлора с возгонами. Для повышения эффективности использования хлора имеются и другие резервы: повышение степени усвоения хлора в реакторе, переработка более чистого по содержанию примесей сырья, более эффективное просушивание поступающих в процесс магнезита и восстановителя.

Тем не менее, опробованная технология, в сравнении с ранее существовавшей технологией хлорирования магнезита в шахтных электропечах (ШЭП) [5], обладает существенными преимуществами (см. табл. 3).

Выводы. Использование в процессе хлорирования магнезита газообразного восстановителя, получаемого в специальном аппарате, позволяет не только повысить в три раза скорость процесса хлорирования и его удельную производительность, но и существенно повысить степень использования сырья и реагентов, обуславливая более высокую экономичность технологии по сравнению с известной технологией хлорирования в ШЭП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Механизм хлорирования магнезита смесью $\text{Cl}_2 + \text{CO}$ / Д. В. Прутцков, В. Н. Девяткин, С. М. Лупинос [и др.] // Цветные металлы. – 1986. – № 5. – С. 52-56.
2. Скорость хлорирования магнезита смесью хлора и оксида углеродом / Д. В. Прутцков, С. М. Лупинос, А. Г. Голов [и др.] // Новые интенсифицированные процессы производства магния (Труды Института титана). – Запорожье, 1986. – С. 9-17.
3. Лупинос С. М. Хлорирование магнезита в солевом расплаве на промышленном карналлитовом хлораторе / С. М. Лупинос, Л. Н. Сабуров, Г. А. Яковлева // Исследования в области металлургии магния (Труды Института титана). – Запорожье, 1987. – С. 12-19.
4. Вуколов В. В. Гранулометрический состав и скорость осаждения окиси магния в хлоридных расплавах / В. В. Вуколов, Н. М. Зуев, С. Н. Аржанова // Совершенствование техники и технологии производства легких металлов. – Л.: ВАМИ, 1980. – С. 128-132.
5. Сушков А. И. Металлургия легких металлов / А. И. Сушков, И. А. Троицкий, М. А. Эйдензон. – Свердловск: УПИ, 1957. – 511 с.
6. Прутцков Д. В. Поведение примесей при хлорировании природного магнезита смесью хлора и оксида углерода / Д. В. Прутцков, С. М. Лупинос, А. Г. Голов // Исследование в области металлургии магния (Труды Института титана). – Запорожье, 1987. – С. 20-25.
7. Жило Н. Л. Исследование физико-химических свойств шлаков системы $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ / Н. Л. Жило, И. С. Острцова // Известия АН СССР. – Металлургия. – 1980. – № 4. – С. 25-31.

Стаття надійшла до редакції 11.01..2010 р.
Рецензент, проф. Г.О. Колобов