

УДК 66.046.41:661.846.622

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ТРИГИДРОКАРБОНАТА МАГНИЯ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ

*Впервые представлены результаты по процессу получения активного оксида магния путем прокатки тригидрокарбоната магния (ТГКМ) в промышленных вращающихся печах. Рассмотрены процессы гранулирования ТГКМ перед подачей в печи, механохимической активации сырья, физико-химические основы процесса термического разложения ТГКМ. Установлена возможность интенсификации процесса за счет введения в ТГКМ катализатора и каталитического воздействия газовой атмосферы. Представлена реакторная схема процесса*

**О.Э. Сердюков**  
Соискатель\*

**И.В. Питак**  
Кандидат технических наук, ассистент\*

**В.П. Шапоров**  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой\*

\*Кафедра химической техники и промышленной экологии  
Национальный технический университет «Харьковский  
политехнический институт»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков-2, 61002

E-mail: ipitak@rambler.ru

Контактный тел.: (8057) 707-66-81

## 1. Введение

В настоящее время активный оксид магния широко применяется в производствах трансформаторной стали, наполнителей резины, адгезивов, пластических масс, огнеупоров и в других областях.

Одной из основных стадий производства оксида магния является термическое обезвоживание и разложение тригидрокарбоната магния  $MgCO_3 \cdot 3H_2O$  (ТГКМ). Этот процесс является типичным топахимическим процессом, протекающим по схеме  $AV_{TB} \rightarrow A_T + B_T$ , характеризуется сложностью кинетики закономерностей и большой энергоемкостью, составляющей 26 – 27 тыс. кДж на 1 кг получаемого оксида магния.

Тепло необходимое для осуществления рассматриваемой реакции, расходуется на нагрев материала до температуры начала реакции и на протяжении непосредственно химической реакции. При этом существенное значение приобретает теплотехническая

характеристика процесса разложения ТГКМ: условия теплопереноса, диффузионные ограничения и т.п. скорость процесса разложения ТГКМ определяется не столько величиной температуры, сколько размерами зерен (гранул) материала, условиями его перемешивания, скоростью нагрева материала до заданной температуры, интенсивностью отдачи тепла от источника к материалу и др. [1, 2]. На морфологию процесса реакции не влияет изменение кинетического и фазового состава (потеря  $H_2O$ ;  $CO_2$ ), морфология продукта реакции, прежде всего размеры образующихся частиц, удельная поверхность, формируются в ходе изменения структуры вещества [1 - 4]. Таким образом морфология продукта, размеры полученных частиц, удельная площадь поверхности наряду с кинетическим и фазовым составами определяют качество оксида магния и его активность. Соотношение указанных свойств в значительной степени определяется типом печи, в которой осуществляется процесс. Обезвоживание и

прокалка ТГКМ на промышленных предприятиях в настоящее время проводится в камерных муфельных печах неподвижного слоя с ручной загрузкой и выгрузкой материала, а также в механических полочных печах [1, 2]. Имеются сведения о процессе обжига гранулированного ТГКМ в лабораторной печи кипящего слоя [5].

Производительность промышленных печных агрегатов по оксиду магния незначительная и составляет для механических полочных печей ~ 55 кг/ч при начальной влажности материала 50 – 55 % (масс.), а для муфельных печей с неподвижным слоем ~ 8,2 кг/ч с 1 муфеля печи. При этом качество продукта по многим показателям (содержание MgO, удельная поверхность, дисперсность и др.) не отвечает мировым стандартам и технологическим требованиям потребителей.

Данных по процессу обжига ТГКМ в других типах печей, например, во вращающихся печах, в литературе нами не обнаружено, хотя имеются указания о перспективности их применения для повышения производительности и повышения активности продукта [6].

В связи с этим в данной работе приведены результаты экспериментальных исследований по процессу термического разложения ТГКМ во вращающихся печах.

## 2. Исследование процесса термического разложения ТГКМ

Исследования проводили на полупромышленной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 1. Установка работала следующим образом. Исходный материал из бункера 1 по шнеку-питателю 2 поступал во вращающуюся печь 3. Барабан печи имел длину 8 м, диаметр в свету - 0,5 м и наружный диаметр - 1 м. Скорость вращения барабана регулировалась с помощью привода ПМСМ и во время опытов составляла 4,5 об/мин. Печь обогревалась природным газом, сжигаемым в двухпроводной горелке 7. Дымовые газы последовательно проходили через загрузочную камеру, циклон 4 и выбрасывались вентилятором 5 в атмосферу. Готовый продукт - окись магния - из печи поступал в холодильник, а затем на затаривание. Степень заполнения барабана печи варьировали в пределах от 0,02 до 0,15. Исходным сырьем служила паста ТГКМ (полученная по содовому способу) следующего состава (% масс. в расчете на сухое вещество): MgO - 18,35, CaO - 0,55, SO<sub>4</sub> - 0,29, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 0,05, н. о. в. HCl - 0,20, потери при прокаливании (600°C) - 79,20; CO<sub>2</sub> - 20,95. ТГКМ поступал на обжиг в печь в виде пасты с физической влажностью до 45 %, в порошкообразном виде с содержанием лишь кристаллизационной воды (MgCO<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O), а также в виде гранул.

Гранулированию подвергали пасту ТГКМ, при этом в ряде случаев для связки добавляли гель гидроокиси магния в количестве от 0,5 до 10 % (масс). Способ приготовления геля Mg(OH)<sub>3</sub> описан в работе [1]. Гель представлял собой тиксотропную массу с частицами Mg(OH)<sub>2</sub> размером ~ 30 Å, соотношение твердого к жидкому в массе соответствовало 1:(2 - 3).

Для гранулирования пасты использовали шнековую прессформирующую машину (ПФМ) диаметром 110 мм, принципиальная схема которой приведена на рис. 2. Скорость вращения протирающего ножа 8 варьировали от 20 до 70 об/мин.

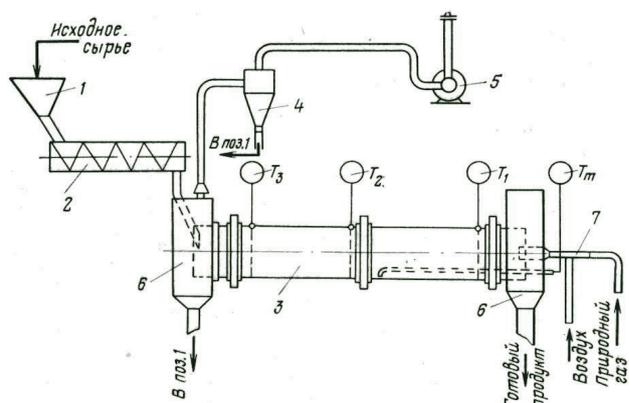


Рисунок 1. Схема опытно-промышленной установки вращающейся печи для обжига тригидрокарбоната магния:

- 1 – бункер; 2 – шнек-питатель; 3 – вращающаяся печь; 4 – циклон; 5 – вентилятор; 6 – приемные камеры; 7 – двухпроводная горелка.

В случае гранулирования пасты ТГКМ производительность ПФМ изменялась от 66 до 72 кг/ч, а при гранулировании пасты со связкой геля Mg(OH)<sub>2</sub> - от 187 до 260 кг/ч.

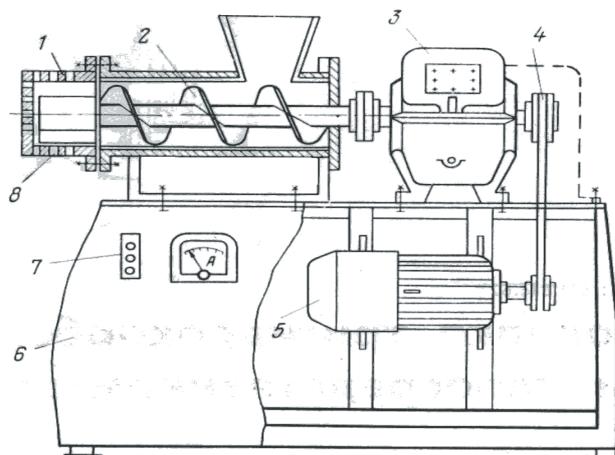


Рисунок 2. Схема опытной прессформирующей машины:

- 1 – перфорированная решетка; 2 – транспортирующий шнек; 3 – редуктор; 4 – клиноременная передача; 5 – электродвигатель; 6 – корпус; 7 – кнопки управления; 8 – эксцентричный протирающий нож.

Гранулометрический состав полупродукта после ПФМ приведен в таблице 1. из приведенных в таблице данных следует, что при гранулировании пасты ТГКМ со связкой геля Mg(OH)<sub>2</sub> оптимальным количеством добавки геля следует считать 4 – 5 % (масс.), поскольку в этом случае около 94 % гранулята составляет гранулы размером более 2 мм, причем эти гранулы обладают наибольшей прочностью.

Таблица 1

Фракционный состав гранулята после прессформирующей машины (средние показатели)

| Материал, поступающий на гранулирование                         | Количество вводимой связки, % (масс.) | Фракционный состав гранулята, % (масс.) |                |                     |
|---|---------------------------------------|---|----------------|---------------------|
|   |                                       | Фракция $\wedge$ 5 мм                   | Фракция 2-5 мм | Фракция $\vee$ 1 мм |
| Паста ТГКМ с влажностью 45 %                                    | -                                     | 9                                       | 60             | 31                  |
|   | 0,5                                   | 3                                       | 82             | 15                  |
| Паста ТГКМ с влажностью 45 % с связкой геля Mg(OH) <sub>2</sub> | 2                                     | 4                                       | 82,5           | 13,5                |
|   | 4                                     | 1,7                                     | 89,5           | 8,8                 |
|   | 5                                     | 2,05                                    | 91,45          | 6,5                 |
|   | 7                                     | 1,5                                     | 82,5           | 16                  |
|   | 10                                    | 0,8                                     | 74,2           | 25                  |

Для оценки результатов, полученных на опытно-промышленной установке, необходимо было выяснить зависимость скорости разложения гранул ТГКМ от их размера.

С этой целью был проведен обжиг гранул диаметрами 1, 3, 5, 7 и 10 мм и длиной 8 - 10 мм при постоянной температуре 600°C и времени выдержки 6 мин в плоских тиглях на воздухе. Как было установлено, полнота разложения ТГКМ зависит от диаметра гранул и для испытанных гранул составляет соответственно 0,89; 0,92; 0,96; 0,93 и 0,91. Это объясняется условиями возникновения и развития реакционной поверхности раздела фаз, а также уровнем диффузионных ограничений. Очевидно, что при обжиге гранул ТГКМ диаметрами 5 мм и менее диффузионные ограничения внутри гранул не сказываются на скорость процесса.

Различие же в степенях превращения для этих гранул, по-видимому, зависит от условий формирования реакционной поверхности раздела и, в первую очередь, связано с вероятностью появления и числом зародышей новой фазы на поверхности гранул [7, 8]. Последнее в значительной мере определяется размером гранул и возрастает с его увеличением [7]. Таким образом, оценка совокупности рассмотренных условий протекания процесса в гранулах позволяет принять рациональный размер равный 5 мм.

Кроме того, для гранулирования пасты в случае добавки геля Mg(OH)<sub>2</sub> использовали двухшнековую машину непрерывного действия с зацепляющимися шнеками встречного вращения для переработки высокосвязных масс типа СН [9]. Использовалась серийно выпускаемая машина СН - 400, производительность по грануляту 1200 кг/час. При работе машины технологические операции по длине шнеков проходили в следующей последовательности.

В первом модуле машины смесь ТГКМ и добавки Mg(OH)<sub>2</sub> уплотняются и одновременно за счет испарения свободной воды, которое происходит за счет тепловой энергии вследствие трения, происходит

пароразрыхление материала с освобождением кристаллизационной воды.

В следующем модуле происходит измельчение и пластическое разрушение частиц MgCO<sub>3</sub> на микро и макро уровнях. При этом перепад давления на этих модулях достигает 8 - 10 МПа. В третьем модуле обрабатываемая смесь пластифицируется, перепад давления достигает 10 - 12 МПа. В четвертом модуле происходит гомогенизация материала. Время пребывания материала в машине 420 с. на выходе из машины получали гранулы размером 10 мм в диаметре и длиной 25 - 30 мм. Полученные гранулы имели свободную влагу 20...25 %, критическое усилие на излом 1,27 МПа.

Фракционный состав: фракция менее 10 мм ~ 1,2 %. Фракция  $\geq$  10 мм ~ 98 %. Полнота разложения ТГКМ, для полученного гранулята на машине типа СН, при 600°C составила 0,995. это свидетельствует о более интенсивном протекании процесса термического разложения MgCO<sub>3</sub> за счет механо-химической обработки материала перед подачей его на обжиг.

Эффект ускорения топочимических процессов за счет механо-химической обработки общеизвестна [10]. Для выявления влияния газовой атмосферы на процесс разложения ТГКМ в промышленных печах в схеме установки рис. 1 вращающаяся печь с непосредственным контактом теплоносителя и материала была заменена муфельной вращающейся печью с электрическим обогревом через стенку.

В качестве устройства использована серийно выпускаемая печь типа СБЗ- 10.63/9С, барабан печи выполнен из стали Х23Н18. рабочая температура 600 - 800 °С.

Подробно конструкция печи описана в [11]. На рис. 3 представлена принципиальная конструкция печи.

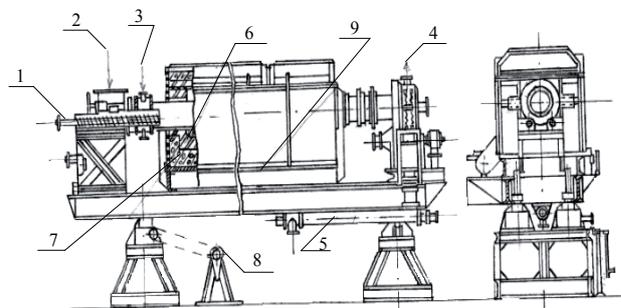


Рисунок 3. Принципиальная конструкция вращающейся электропечи типа СБЗ

1 - дозирующий шнек; 2 - подача гранулята; 3 - подача газа; 4 - отвод отходящего газа; 5 - выгрузка материала; 6 - электронагреватели 4 7 - футеровка печи; 8 - привод печи; 9 - корпус барабана.

### 3. Результаты опытов по обжигу ТГКМ на полупромышленной установке

Основные результаты по исследованию процесса обжига ТГКМ во вращающихся печах представлены в таблице 2.

Как следует из приведенного в таблице 2 экспери-

Таблица 2

Результаты опытов по обжигу ТГКМ на полупромышленной установке вращающейся печи в установленном режиме работы (приведены средние показатели)

| Показатель  | Опыт печь с непосредственным контактом |   |                                   |   |   |   |   |  | Опыт печь СБЗ   |   | Опыт газ-воздух   |
|---|--|---|-----------------------------------|---|---|---|---|--|---|---|---|
|   | 1                                      | 2   | 3                                 | 4   | 5   | 6   | 7   | 8  | 9   | 10  | 11  |
| Продолжительность опыта, ч                                  | Паста ТГКМ                             | Паста ТГКМ на подложке готового материала | Сухая паста ТГКМ                  | Паста ТГКМ гранулированная, диаметр гранул – 2.9 мм | Паста ТГКМ гранулированная, диаметр гранул – 4.2 мм | Паста ТГКМ гранулированная, связка-гель Mg(OH) <sub>2</sub> диаметр гранул – 4.9 мм | Паста ТГКМ гранулированная, связка-гель Mg(OH) <sub>2</sub> диаметр гранул – 7 мм | Паста ТГКМ гранулированная, связка-гель Mg(OH) <sub>2</sub> диаметр гранул – 10 мм | Паста ТГКМ, гранулы в СН связка-гель Mg(OH) <sub>2</sub> диаметр гранул – 10 мм | Паста ТГКМ, гранулы в СН связка-гель Mg(OH) <sub>2</sub> диаметр гранул – 10 мм | Паста ТГКМ, гранулы в СН связка-гель Mg(OH) <sub>2</sub> диаметр гранул – 10 мм |
| Влажность загружаемого материала % (масс.)                  | 44.5                                   | Паста ТГКМ 44.5                           | Содержит кристаллизированную воду | 42.8  | 43.5  | 44.5  | 44.5  | 25   | 25  | 25  | 25  |
| Производительность по исходному материалу, кг/ч             | 140                                    | 155                                       | 148                               | 200   | 300   | 420   | 420   | 640  | 420   | 420   | 420   |
| Производительность по готовому продукту (100 %-й MgO), кг/ч | 28.5                                   | 25.4                                      | 24.2                              | 33.5  | 53  | 72  | 72  | 111  | 100   | 100   | 72  |
| Расход, м <sup>3</sup> /ч                                   |  |   |                                   |   |   |   |   |  |   |   |   |
| • природного газа   | 9.9                                    | 10.2                                      | 10.2                              | 11.5  | 14.8  | 15.2  | 15.8  | 15.2   | -   | -   | -   |
| • первичного воздуха  | 30.5                                   | 32.0                                      | 30.7                              | 35.4  | 35.0  | 35.2  | 35.2  | 35.2   | -   | -   | -   |
| Температура, °С   |  |   |                                   |   |   |   |   |  | Раб. темп. 500  | Раб. темп. 500  | Раб. темп. 500  |
| • газовой среды в горячей головке печи                      | 820                                    | 820                                       | 820                               | 780   | 750   | 710   | 710   | 700  |   |   |   |
| • отходящих газов   | 270                                    | 250                                       | 260                               | 198   | 210   | 200   | 205   | 190  | 480   | 450   | 690   |
| • выгружаемого из печи материала (перед холодильником)      | 705                                    | 715                                       | 700                               | 685   | 680   | 630   | 640   | 640  |   |   |   |
| Разрежение в загрузочной камере, мм.вод.ст.                 | 3                                      | 3   | 3                                 | 4   | 4   | 4   | 4   | 4  | 4   | 4   | 4   |
| Химический состав готового продукта, %                      |  |   |                                   |   |   |   |   |  |   |   |   |
| • MgO   | 90.3                                   | 91.5                                      | 92.0                              | 91.0  | 93.0  | 96.9  | 93.5  | 99.9   | 99.5  | 98.5  | 93.5  |
| • CO <sub>2</sub>   | 2.6                                    | 1.8                                       | 1.9                               | 2.1   | 1.2   | 0.5   | 1.2   | 1.2  | 0.2   | 0.2   | 1.2   |
| • Потери при прокаливании                                   | 6.0                                    | 5.0                                       | 4.2                               | 5.2   | 3.8   | 1.2   | 4   | 4  | 0.3   | 0.5   | 4   |

Продолжение таблицы 2

|   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| • Унос пыли (по балансу MgO), % (масс.)   | 16,4  | 17,1  | 19,2  | 12,4  | 9,0   | 5,9   | 3,3   | 0,8   | 0,5   | 0,5   | 0,5   |
| Удельный съём готового продукта (100 %-й MgO) с внутренней поверхности печи, кг/(м <sup>2</sup> ·ч) | 2,2   | 2,03  | 1,9   | 2,6   | 3,9   | 5,5   | 5,5   | 8,9   | 9,2   | 9,2   | 5,8   |
| Удельный расход условного топлива на 1 т 100%-го MgO, кг/т  | 427,4 | 502,8 | 527,9 | 377,4 | 338,4 | 251,4 | 252,0 | 225   | 200   | 190,0 | 352,0 |
| Удельная поверхность готового продукта после холодильника м <sup>2</sup> /ч                         | 45,0  | 50,0  | 45,0  | 62,5  | 65,0  | 120,5 | 175,0 | 190,0 | 220,0 | 195,0 | 175,0 |

ментального материала, степень превращения ТГКМ и производительность печи возрастают при обжиге гранулята. Обжиг гранулята способствует не только повышению транспортных возможностей печи, но и интенсивному теплообмену в слое обжигаемого материала. Как и следовало ожидать при обжиге в печи наблюдается зависимость степени превращения от размера гранул. Так в первом типе вращающейся печи максимальная степень вращения отмечалась при обжиге гранул размером 4,9 мм. При увеличении размера гранул до 7 мм и более наблюдается уменьшение содержания MgO в продукте. Этого можно избежать, если при гранулировании исходный материал подвергается механо-химической обработке. Последняя обеспечивает не только равномерное распределение связки Mg(OH)<sub>2</sub> по объему гранулы MgCO<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O, но и за счет вышеотмеченных особенностей процессов, протекающих в машине типа СН, обеспечивается активация смеси с увеличением количества потенциальных центров зародышеобразования новой фазы, что приводит к интенсификации процесса. Это наглядно следует из данных приведенных в таблице 2 (колонка 8).

Рассмотрим особенности обжига гранул ТГКМ с добавкой в качестве связки Mg(OH)<sub>2</sub>. Как следует из приведенных в табл. 2 данных, при прочих равных условиях гранулы с добавкой геля Mg(OH)<sub>2</sub> обжигаются быстрее и достигаются более высокие степени превращения. Анализ наблюдаемого явления показал, что гель Mg(OH)<sub>2</sub> значительно влияет на процесс разложения ТГКМ и это влияние многофакторно. Во-первых, гель Mg(OH)<sub>2</sub> является хорошим связующим материалом. Это интенсифицирует процесс гранулирования, увеличивает прочность формовок и предотвращает их разрушение при термообработке в подвижном слое. Во-вторых, гранулы после зоны сушки в печи (200 - 300°C) имеют развитую пористую структуру.

Пористость гранул с добавкой Mg(OH)<sub>2</sub> составляла 48 % при среднем диаметре пор 16000 Å, в то время как без добавки Mg(OH)<sub>2</sub> пористость была 29% при среднем диаметре пор 6000 Å. Высокая пористость гранул способствует увеличению интенсивности тепло-массообмена вглубь и изнутри на поверхность гранул. Пористость гранул повышается за счет дегидроксиляции Mg(OH)<sub>2</sub> при температурах 200 -300°C, что способствует интенсивной миграции молекул воды изнутри на поверхность гранулы. По-видимому, эти же условия обуславливают не только получение пористой структуры гранул, но и более дефектной структуры карбоната магния. В-третьих образовавшаяся из геля Mg(OH)<sub>2</sub> и равномерно распределенная по объему гранулы аморфная окись магния создает до начала разложения MgCO<sub>3</sub> поверхность раздела фаз MgCO<sub>3</sub> - MgO. Наличие такой поверхности, как известно [12], способствует значительному увеличению числа зародышей новой фазы за счет деформационного взаимодействия кристаллических решеток MgCO<sub>3</sub> и MgO.

Следовательно, добавка геля Mg(OH)<sub>2</sub> в гранулы влияет на физические, химические и микроскопические факторы процесса разложения ТГКМ. Это обеспечивает значительное увеличение производительности печи, снижение расходных норм условного топлива на 1 т 100%-ного MgO и повышает реакционную способность продукта. Оценка показателей, полученных на опытно-промышленной установке, показала, что они превосходят аналогичные показатели наиболее эффективных промышленных печей в производстве окиси магния. Так, например, на одном из заводов работает муфельная механическая полочная печь диаметром 4,2 и высотой 7 м, имеющая 4 материальных свода с рабочей поверхностью 70 м<sup>2</sup>. При начальной влажности исходного гидрокарбоната 50 - 55% (масс.) производительность печи состав-

ляет 50 - 55 кг/ч, а удельный съем готового продукта не превышает 1 кг/м<sup>2</sup>. При этом удельный расход топлива на 1 т 100%-ного MgO превышает 2000 кг. Получаемый продукт содержит основного вещества не более 92%.

Приведенные в таблице 2 результаты исследований свидетельствуют, что очень значительное влияние на процесс термического разложения ТГКМ может оказать состав газовой атмосферы в печи (см. табл. 2 колонки 9, 10, 11). Из приведенных данных следует, что обжиг гранулированного материала в атмосфере H<sub>2</sub>O или NH<sub>3</sub> позволяет при значительно более низких температурах достичь полного разложения MgCO<sub>3</sub>, существенно снизить энергозатраты на процесс и при этом получить продукт с удельной поверхностью более 190 м<sup>2</sup>/г. механизм влияния этих газов на процесс разложения ТГКМ описан нами ранее [13], из результатов табл. 2 можно сделать вывод о адекватности ранее представленного механизма.

### Выводы

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о перспективности применения вращающихся печей в производстве окиси магния. Очевидно, что наиболее перспективен обжиг гранулированного материала на связке геля Mg(OH)<sub>2</sub>. это способствует улучшению всех показателей печи. В том числе снижению уноса пыли до 0,5 – 3 % по сравнению с уносом при обжиге не гранулированного материала (17 %) и уносом в промышленных печах (19 – 20%).

Для производства специальных сортов активного оксида магния с удельной поверхностью более 190 м<sup>2</sup>/г и содержанием основного вещества более 97 % целесообразно при гранулировании исходного материала осуществлять механохимическую активацию сырья и последующий обжиг в регулируемой газовой атмосфере. Таким образом приведенные результаты исследований дают основание для модернизации производства активного оксида магния за счет применения вращающихся печей и новых интенсивных режимов обжига, в результате чего выпускаемый продукт активный оксид магния будет отвечать мировым стандартам.

### Литература

1. Шапоров В.П. Разработка процесса получения активной окиси магния // Диссер. на соиск. уч. ст. к.т.н. по спец. 05.340. Пермь, ППИ - 1975, 155 с.
2. Шапоров В.П. технология армирующих наполнителей // Диссер. на соиск. уч. ст. д.т.н. по спец. 05.17.01. ХГПУ, Харьков - 1995, 320 с.
3. Ridge M.L., Surkevicius H., Goto M Some Properties of Artificial Orthorhombic anhydrite // Austral J. Chem. – 1964 v 17, № 11p1197.
4. Widemann H.G. Thermal decomposition processes and their nucleation characteristics // Z. anal/ Chem – 1975, B 276, № 1, S 23.
5. Б.Н. Нестеров, Ю.Х. Локшин, Е.В. Коровин. Сушка и прокатка основного карбоната магния в печах кипящего слоя // Вопросы технологии получения магниевых продуктов. сб. ст. под ред. С.С. Макарова, Б.А. Шойхета. ГИПХ, Л. – 1973. с. 102 – 106.
6. Булат А.Е., Долкарт А.Ф., Шапоров В.П. Обжиг тригидрокарбоната магния во вращающихся печах при непосредственном контакте теплоносителя и обжигаемого материала // Химическая промышленность 1978, 3 9, с. 689 – 692.
7. Розовский А.Я. Кинетика топочимических реакций. М.– Химия, 1974, с. 219.
8. Химия твердого состояния. Под ред. В. Гарнера. М. ил., 1961. – 420 с.
9. А.Я. Ясногородский, А. Г. Звездин. Многоцелевые шнековые машины для перерабатывающих технологий. Харьков, Прапор 2006 – 176 с.
10. В.В. Болдырев. Химия твердого тела, проблемы, перспективы // Изв. СО. АН СССРхим. – 1976, № 4, 8.2 с. 108 – 117.
11. М.Ш. Исламов. Печи химической промышленности. изд. Химия. Л. – 1975 – 432 с.
12. Булат А.Е., Шапоров В.П., Воробьева Р.Д. О термической диссоциации карбонатов магния, кальция, кадмия в присутствии добавок твердого продукта реакции // Журнал прикл. химии – 1978, № 10, с. 2393.
13. Булат А.Е., Шапоров В.П., Воробьева Р.Д. К вопросу о влиянии состава газовой атмосферы на кинетику термической диссоциации карбоната магния // Журн. прикл. химии – 1978, № 10, с. 2393 – 2394.