

Шокота М. Ю.

Дніпровський державний технічний університет

Кравченко О. В.

Дніпровський державний технічний університет

Гуляєв В. М.

Дніпровський державний технічний університет

Коваленко А. Л.

Дніпровський державний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ МАГНІЙ ОКСИДУ З РОЗЧИНІВ МАГНІЙ ХЛОРИДУ ЗА АМОНІАЧНОЮ СХЕМОЮ

Для забезпечення можливості застосування хлоридних магнієвих розчинів і розсолів типу бішофіту для виробництва високоякісного магній оксиду необхідне дослідження і вдосконалення процесу отримання MgO з MgCl_2 із застосуванням амонійвмісних реагентів. У даній роботі було експериментально відпрацьовано чотири режими отримання MgO за так званою «амоніачною схемою» із застосуванням розчину амоній хлориду. Представлено результати дослідження впливу концентрації розчину NH_4Cl на процес осадження $\text{Mg}(\text{OH})_2$ з модельних розчинів MgCl_2 і розчину природного бішофіту Затуринського родовища Полтавської області. Удосконалений спосіб отримання MgO включав обробку хлормagneзівного розчину газоподібним амоніаком або амоній гідроксидом в присутності NH_4Cl в розчині в кількості $\leq 200 \text{ г/дм}^3$, відокремлення, промивання і прожарювання осаду при $900\text{--}1200^\circ\text{C}$. Встановлено, що застосування NH_4Cl як осаджуючого агенту, дає змогу значно збільшити швидкість кристалізації $\text{Mg}(\text{OH})_2$ і фільтрації утвореної суспензії. У результаті застосування NH_4Cl було отримано зразки магній оксиду високого ступеня чистоти, що відповідали вимогам національних стандартів якості для застосування в різних галузях, у тому числі, в медицині. Доведено технічну доцільність використання NH_4Cl як осаджувача $\text{Mg}(\text{OH})_2$, що забезпечило загальний ступінь перетворення MgCl_2 на MgO понад 99 %. Встановлено, що амоній хлорид сприяє прискоренню процесів кристалізації та формуванню щільної структури осаду гідроксидів, що добре фільтрується. Розроблено оптимальні умови введення амонійвмісних реагентів у розчин для максимального осадження $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Показано можливість повторного використання маткового розчину та регенерації амоніаку з нього. Удосконалена методика є практично безвідходною, усі реагенти використовуються в замкненому циклі, що збільшує швидкість відстоювання суспензій, а також сприяє ущільненню осаду та зменшенню його об'єму. Отримані результати дають змогу інтенсифікувати процес отримання високочистого MgO з низьким вмістом хлору ($< 0,1\%$) з природних джерел, зокрема, бішофіту.

Ключові слова: магній оксид, магній гідроксид, осадження, фільтрація, кристалізація, бішофіт, хлор.

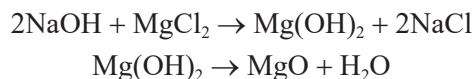
Постановка проблеми. Магнію оксид (магнезія, MgO) є найпоширенішою і найважливішою для промислового застосування сполукою магнію. MgO широко використовують під час виробництва сталі, вогнетривів, гумотехнічних виробів, а також у будівельній, шкіряній, хімічній, харчовій, фармацевтичній, нафто- та газовидобувній та інших галузях промисловості. Магнезія – це хімічно чистий MgO , відомий також під назвою «периклаз» [1, с. 154]. Основними сировинними

матеріалами для виробництва магній оксиду в Україні є два природні мінерали: магній карбонат (магнезит, MgCO_3) і магній хлорид гексагідрат (бішофіт, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Для виробництва високо-чистого MgO як природну сировину використовують також мінерал карналіт ($\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

Для виробництва MgO в промисловому масштабі застосовують два основні технологічні процеси. Перший ґрунтується на високотемпературній декарбонізації природного MgCO_3 (маг-

незиту) шляхом його випалювання в спеціальних печах з отриманням цільового MgO (так званий «сухий» спосіб). Другий – на отриманні $\text{Mg}(\text{OH})_2$ шляхом взаємодії сильного дм³угу (NaOH або $\text{Ca}(\text{OH})_2$) з розчинами хлориду магнію (бішофіту) та подальшій дегідратації отриманого й промитого від хлоридів $\text{Mg}(\text{OH})_2$ шляхом випалювання у спеціальних печах (так званий «мокрый» спосіб) [2, с. 149].

Хімізм «мокрого» способу описується такими хімічними реакціями:



Залежно від якості вихідної сировини і способу виробництва, магnezія містить від 55 % до 99 % MgO . Основними домішками є: SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , Al_2O_3 , NaCl і MgCl_2 .

Застосування MgO в медицині насамперед пов'язане зі здатністю магнію активувати ферментативну діяльність організму, тому магній оксид використовують як компонент багатьох ліків. Основними захворюваннями, за яких використовують сполуки магнію, є синдром дефіциту уваги, стенокардія, аритмія серця, астма, хронічна обструктивна хвороба легень, високий артеріальний тиск, діабет, камені в нирках [3, с. 1415]. У роботі [4, с. 778] оцінювали антибактеріальну активність наночастинок MgO по відношенню до *Lactobacillus plantarum*. Нанорозмірні частинки MgO для цих цілей було отримано таким методом: суміш магній нітрату гексагідрату, натрій карбонату та етиленгліколю обробляли ультразвуком з подальшим прожарюванням при температурі 410 °С. При збільшенні концентрації до 1000 ppm і часу впливу частинок MgO на *Lactobacillus plantarum* до 24 год спостерігається практично повне знезараження розчинів.

Фактори, що характеризують сталий розвиток виробництва «мокрим» способом, пов'язані з наявністю родовищ високоякісного бішофіту та збереженням запасів протягом наступних 40–50 років. В Україні Чернігівські та Полтавські бішофітні поля ще недостатньо досліджені, хоча фармацевти реалізують в аптеках бішофіт. Затуринського родовища. Зважаючи на глибинне залягання пластів бішофіту (800–1000 м), видобуток його може здійснюватися тільки геотехнологічним способом – методом підземного розчинення. З огляду на необхідність великих кількостей прісної води для розчинення, ДП «ДонНДГРІ» запропонувало для цього використовувати води, що супроводжують видобуток нафти й газу, які своєю

чергою збагачуватимуть розсоли бішофіту йодом і бромом [5, с. 933].

Аналіз літературних джерел показав, що механізм і кінетика процесу одержання магній оксиду з бішофіту недостатньо досліджені. Крім того, не до кінця встановлена структура одержуваного гідроксиду і дисперсність частинок $\text{Mg}(\text{OH})_2$ у суспензії. Також залишаються невизначеними оптимальні умови, що забезпечують стабільність суспензії $\text{Mg}(\text{OH})_2$, її адгезійні властивості та термічну стійкість утворених частинок. Відсутність інформації з цих питань ускладнює організацію процесу отримання високочистого MgO для медичного застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фізико-хімічною основою виробництва MgO з природних розсолів є система $\text{MgO}-\text{CaO}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ [6, с. 21]. При цьому було показано, що з ропи можуть бути отримані для промислових цілей тільки два проміжних продукти, на яких може базуватися виробництво MgO : магній гідроксид (брусит) і магній гідрокарбонат (гідромагnezит). Магній гідроксид має суттєві переваги перед гідрокарбонатом за виходом MgO (в 1,6 раза більше) і за спіканням (пористість після випалу при температурі 1600 °С до семи разів менша). За останні роки ці висновки отримали нові наукові та практичні підтвердження. Отримано нові дані [7, с. 10196] про будову системи $\text{MgO}-\text{CaO}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ в координатах «тиск–температура», які дають змогу розглядати процеси взаємодії в цій системі в дуже широких інтервалах змін зовнішніх термодинамічних параметрів, що полегшує вибір оптимальних технологічних режимів.

Процеси дегідратації $\text{Mg}(\text{OH})_2$ і спікання MgO , який при цьому утворюється, вивчено досить ґрунтовно і докладно описані в літературі. За допомогою ядерного магнітного резонансу встановлено [8, с. 933], що структурна вода видаляється з бруситу за температури вище 280 °С. Пари води мають визначальний вплив на процес дегідратації $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

Підтверджено [9, с. 894], що магній оксид з $\text{Mg}(\text{OH})_2$ виходить більш активним, ніж з гідрокарбонату. При температурі 1000 °С зберігається пластинчаста будова зерен, а при 1400 °С відбувається спікання агрегатів. Діаметр зазначених частинок – 75 нм, товщина – близько 10 нм, розміри пор – порядку 40 нм. Дещо менша величина кристалітів після випалу за температури 700 °С: діаметр – 32 нм, а після випалу за температури 1000 °С – 57 нм. Загальна пористість окремих агрегатів після випалу за 1000 °С становить близько 2 %, а отри-

маних із MgHCO_3 – близько 2,6 %. Тому спікання матеріалу, отриманого з $\text{Mg}(\text{OH})_2$, є результатом кооперативного процесу ущільнення агрегатів. Пари води підвищують швидкість цього процесу при 1050°C приблизно в 1000 разів [10, с. 1956].

Процес спікання ропного магній оксиду неодноразово був предметом вивчення. Встановлено, що пари NaCl при $1300\text{--}1400^\circ\text{C}$ прискорюють ріст зерен периклазу [11, с. 102]. Магній оксид реагує з водяною парою без присутності води, тоді як для реакції з CO_2 необхідна конденсована волога. У присутності парів води в газовій фазі за високих температур завжди присутній $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Процеси високотемпературного спікання і рекристалізації магній оксиду з гідроксиду та інших солей вивчені детально [12, с. 58], в тому числі, на особливо чистих препаратах [13, с. 375].

Таким чином, з наведених даних випливає, що отримання високоякісного магній оксиду потребує проведення додаткових досліджень. Основними науковими завданнями з виробництва чистого CaO на базі полтавського бішофіту є:

- 1) очищення ропи від забруднень і небажаних компонентів;
- 2) підвищення швидкості осадження і поліпшення фільтрації $\text{Mg}(\text{OH})_2$;
- 3) удосконалення методів випалу $\text{Mg}(\text{OH})_2$ з метою одержання зерен із пористістю не більше 10–12 %;
- 4) розробка методів отримання інших продуктів з ропи для підвищення економічності процесу виробництва MgO .

Постановка завдання. Мета роботи – дослідити фізико-хімічні закономірності осадження та сепарації $\text{Mg}(\text{OH})_2$ з розчинів, які містять MgCl_2 та запропонувати спосіб інтенсифікації даних процесів, який може бути застосований для переробки бішофіту Затуринського родовища.

Виклад основного матеріалу. У даній роботі було вдосконалено амоніачний метод отримання магній оксиду високої чистоти. З огляду на те, що в більшості відомих способів, під час осадження $\text{Mg}(\text{OH})_2$ цільовий продукт значною мірою забруднений сульфатами, які практично не відмиваються [14, с. 11; 15, с. 10], у роботі було сфокусовано основну увагу на підвищенні швидкості відокремлення осаду і зниженні його вологості.

Відомо [16, с. 4073], що при отриманні $\text{Mg}(\text{OH})_2$ з хлормagneзних розчинів (вміст MgCl_2 – $150\text{--}300\text{ г/дм}^3$) отримують дрібнокристалічний ($\leq 0,5\text{ мкм}$) осад гідроксидів з низькою швидкістю фільтрації, порядку $10\text{--}12\text{ кг/(м}^2 \cdot \text{год)}$. При його відмиванні на фільтрі до залишкового вмісту

іонів $\text{Cl}^- \leq 1\%$, витрата промивної води становить $15\text{--}20\text{ м}^3$ на 1 т MgO . Тому було розроблено вдосконалений спосіб отримання магній оксиду, що включає обробку хлормagneзного розчину газоподібним амоніаком або амоній гідроокисом в присутності хлористого амонію в розчині в кількості $\leq 200\text{ г/дм}^3$, з наступним відокремленням, промиванням і прожарюванням осаду при $900\text{--}1200^\circ\text{C}$.

Концентрації магнію та іонів Cl^- у розчинах визначали методом титрування розчином трилону Б і розчином нітрату срібла, відповідно, за стандартними методиками [17, с. 50; 18, с. 69]. Отримання MgO з модельних розчинів MgCl_2 проводили наступним чином. Процес змішування реагентів проводили протягом 1–2 год. Отриманий $\text{Mg}(\text{OH})_2$ відокремлювали згущенням і фільтрацією, промивали від баластних солей протягом 2–3 год і прожарювали 1–3 год при $900\text{--}1200^\circ\text{C}$.

У першому експерименті до 1 дм^3 розчину, що містив $263\text{ г/дм}^3\text{ MgCl}_2$, вводили $0,32\text{ дм}^3$ розчину, що містив $290\text{ г/дм}^3\text{ NH}_4\text{Cl}$ і $4\text{ г/дм}^3\text{ MgCl}_2$. У результаті отримували суміш, що містила $200\text{ г/дм}^3\text{ MgCl}_2$ і $70\text{ г/дм}^3\text{ NH}_4\text{Cl}$. У неї вводили 141 г газоподібного амоніаку (надлишок NH_3 по відношенню до стехіометрії – 50 %) та перемішували протягом 1 год. У результаті осадження отримували магній гідроксид з виходом $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 85 %. Утворену суспензію в кількості $1,32\text{ дм}^3$, що містила $104,1\text{ г/дм}^3\text{ Mg}(\text{OH})_2$, відстоювали, при цьому швидкість фільтрації становила $85\text{ кг/(м}^2 \cdot \text{год)}$. Згущену пульпу в кількості $0,91\text{ дм}^3$, що містила $151\text{ г/дм}^3\text{ Mg}(\text{OH})_2$, фільтрували на вакуум-воронці за $\Delta P = 400\text{ мм рт. ст.}$ Швидкість фільтрації становила $70\text{ кг/(м}^2 \cdot \text{год)}$. Матковий розчин містив $32,2\text{ г/дм}^3\text{ MgCl}_2$, $205\text{ г/дм}^3\text{ NH}_4\text{Cl}$ і $49,9\text{ г/дм}^3$ надлишкового амоніаку. Осад промивали на фільтрі 285 см^3 води та отримували 271 г пасти, що містила 50,8 % $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

Відфільтрований осад магній гідроксиду прожарювали 2 год за 900°C і отримували 95,7 г магній оксиду, що містив 99,3 % MgO і $\leq 0,02\%$ хлору. Далі в матковий розчин із промивними водами в кількості $1,52\text{ дм}^3$ і з концентрацією MgCl_2 $26,1\text{ г/дм}^3$, NH_4Cl – $165,9\text{ г/дм}^3$, NH_3 – $40,4\text{ г/дм}^3$ при $50\text{--}60^\circ\text{C}$ вводили CO_2 в кількості $36,6\text{ г}$. У результаті осаджувався основний магній карбонат $4\text{MgO} \cdot 3\text{CO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ в кількості $32,3\text{ г}$. У розчині залишалося $\leq 4\text{ г/дм}^3\text{ MgCl}_2$. Сумарний вихід за магнієм становив 97,8 %. Суспензію відстоювали, при цьому швидкість фільтрації становила $60\text{ кг/(м}^2 \cdot \text{год)}$.

Згущену пульпу з концентрацією твердої фази 200 г/дм^3 відфільтровували на вакуум-

воронці за $\Delta P = 400$ мм рт. ст., зі швидкістю фільтрації $1000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$. Відфільтрований осад у кількості 100 г, що містив 14,3 г MgO , промивали на воронці 170 см^3 води. Промитий осад прожарювали протягом 3 год при 950°C . У результаті отримували 23,2 г магній оксиду із вмістом MgO 99,3 %. Сумарний вихід MgO становив 90 %.

Промивні води змішували з матковим розчином. $0,32 \text{ дм}^3$ отриманого розчину направляли для змішування з вихідним розчином магній хлориду на наступну операцію осадження. З решти розчину регенерували амоніак, який повертали на осадження $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Матковий розчин після осадження $4\text{MgO} \cdot 3\text{CO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ містив $4 \text{ г}/\text{дм}^3 \text{MgCl}_2$ і $213 \text{ г}/\text{дм}^3 \text{NH}_4\text{Cl}$.

Дані, що доводять технологічні переваги розробленого способу, представлено на рисунках 1 і 2 (умови проведення експериментів: вихідна концентрація MgCl_2 – $190 \text{ г}/\text{дм}^3$, $t = 40\text{--}50^\circ\text{C}$).

Максимальну концентрацію амонійвмісної добавки підбирали з огляду на той факт, що за концентрації амоній хлориду понад $200 \text{ г}/\text{дм}^3$ починається кристалізація солей.

Експерименти 2 і 3 були проведені аналогічно першому, але відрізнялися вмістом NH_4Cl у вихідному хлормagneвному розчині. Основні технологічні показники розроблених способів осадження $\text{Mg}(\text{OH})_2$ наведено в таблиці 1.

З метою перевірки ефективності розробленого способу, був проведений четвертий експеримент, у якому як вихідну магнієвмісну сировину використали розсіл бішофіту Затуринського родовища

Полтавської області. Хімічний склад і основні характеристики використаного розсолу представлені в таблиці 2.

Експеримент проводили в такій послідовності. У реактор ємністю 2 дм^3 , що містив суспензію магнію ($75 \text{ г}/\text{дм}^3 \text{MgO}$), у розчині з концентрацією NH_4Cl $193 \text{ г}/\text{дм}^3$, MgCl_2 $31,8 \text{ г}/\text{дм}^3$, вводили розчини магній хлориду, отриманого підземним вилюговуванням природного бішофіту (MgCl_2 $392 \text{ г}/\text{дм}^3$, NaCl $3,3 \text{ г}/\text{дм}^3$, CaSO_4 $0,4 \text{ г}/\text{дм}^3$, CaCl_2 $2,8 \text{ г}/\text{дм}^3$) зі швидкістю $1 \text{ дм}^3/\text{год}$, і NH_4OH ($240 \text{ г}/\text{дм}^3 \text{NH}_3$) зі

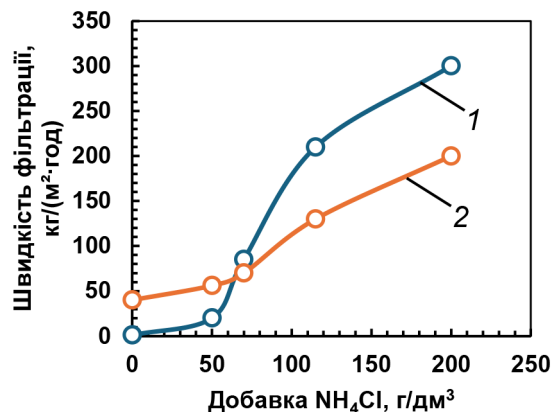


Рис. 1. Залежність фільтраційних властивостей суспензії $\text{Mg}(\text{OH})_2$ від кількості доданого NH_4Cl : 1 – просте відстоювання; 2 – фільтрація на вакуум-воронці

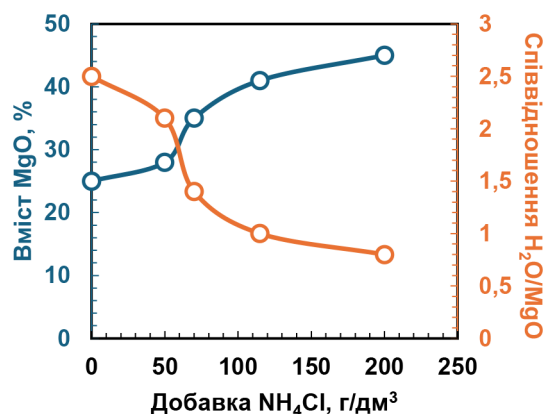


Рис. 2. Залежність вмісту MgO в суспензії $\text{Mg}(\text{OH})_2$ від кількості доданого NH_4Cl

швидкістю $0,9 \text{ дм}^3/\text{год}$ (надлишок амоніаку 50 %). Тривалість змішування становила 1 год, температура – 65°C . Суспензію, що містила $108 \text{ г}/\text{дм}^3 \text{Mg}(\text{OH})_2$, вводили у відстійник у кількості $2 \text{ дм}^3/\text{год}$, туди ж подавали 0,04%-вий розчин флокулянту (поліакриламід марки «*Extrafloc*») зі швидкістю $20 \text{ см}^3/\text{год}$. Питома швидкість фільтрації становила $300 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

Згущену пульпу з концентрацією MgO $400 \text{ г}/\text{дм}^3$ у кількості $0,5 \text{ дм}^3/\text{год}$ подавали на фільтрацію і промивання. При вакуумі 400 мм рт. ст. на фільтрувальній воронці тривалість фільтрації ста-

Таблиця 1

Технологічні показники процесу осадження CaO з розчину MgCl_2

Експеримент	Концентрація NH_4Cl у розчині перед введенням NH_3 , $\text{г}/\text{дм}^3$	Швидкість фільтрації $\text{Mg}(\text{OH})_2$, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$	Температура прожарювання $\text{Mg}(\text{OH})_2$, $^\circ\text{C}$	Тривалість прожарювання $\text{Mg}(\text{OH})_2$, год	Вміст MgO у кальцій оксиді, %	Вміст Cl у кальцій оксиді, %
1	70	85	900	1	99,1	0,02
2	140	250	1200	2	99,3	0,005
3	200	300	900	2	99,2	0,03

Таблиця 2

Хімічний склад та основні характеристики бішофіту Затуринського родовища

Показник	Значення
Колір	Жовто-коричневий
pH	4,95–6,05
Na+K, мг/дм ³	23,2
Ca ²⁺ , мг/дм ³	1940
Mg ²⁺ , мг/дм ³	90020
Sr ²⁺ , мг/дм ³	2,89
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	<0,03
NO ₂ ⁻ , мг/дм ³	<0,008
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	<0,34
F ⁻ , мг/дм ³	0,42
Cl ⁻ , мг/дм ³	254000
Г, мг/дм ³	43,7
Br ⁻ , мг/дм ³	2704
As ⁻ , мг/дм ³	30,1
SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³	15,8
HCO ₃ ⁻ , мг/дм ³	220
H ₃ BO ₃ , мг/дм ³	50,2

новила 0,8 хв, питома продуктивність фільтра – 1700 кг/(м² · год). Осад промивали на лійці 300 см³ води протягом 2 хв і одержували 270 г відфільтрованої пасти Mg(OH)₂, яка містила 55 % MgO і 0,4 % хлору.

Пасту прожарювали протягом 3 год при 1200 °С і отримували 148 г магній оксиду, що містив 99,6 % MgO, 0,005 % Cl, 0,05 % CaO. Матковий розчин після згущення і фільтрації Mg(OH)₂ та промивні води в кількості 1,9 дм³/год, які містили 209 г/дм³ NH₄Cl, 32,8 г/дм³ MgCl₂ і 52,4 NH₃, направляли на стадію осадження основного карбонату магнію. Для цього в матковий розчин додавали CO₂ зі швидкістю 30 дм³/год. У результаті осаджувалася

сполука 4MgO · 3CO₂ · 4H₂O в кількості 54 г/год. У розчині залишалось 4 г/дм³ MgCl₂. Сумарний вихід за магнієм становив 97 %.

Матковий розчин разом із промивними водами в кількості 2,5 дм³ містив, г: MgCl₂ – 9,1; NH₄Cl – 474, NH₃ – 119. Суспензію відстоювали і фільтрували зі швидкістю 60 кг/(м² · год). Згущену пульпу з концентрацією твердої фази 200 г/дм³ відфільтровували на вакуум-воронці за ΔP = 400 мм рт. ст. при швидкості фільтрації 1000 кг/(м² · год). Відфільтрований осад у кількості 168 г/год, що містив 23 г MgO, промивали на лійці 280 см³ води. Промитий осад прожарювали протягом 3 год при 1200 °С. У результаті було отримано 24 г магній оксиду із вмістом 99,5 % MgO. Сумарно отримано 175 г MgO, тобто загальний вихід продукту склав 99,9 %. Матковий розчин разом із промивною водою направляли на регенерацію амоніаку, який повертали на осадження магнію на наступних стадіях.

Висновки. Магній оксид, отриманий за пропонуванним способом, відповідав вимогам, що ставляться до магній оксиду згідно до ДСТУ EN 16004:2022, магnezії вищого класу (ДСТУ EN 12485:2022) і магній оксиду фармацевтичної кваліфікації (CAS: 1309-48-4). Використання пропонованого способу, порівняно з відомими аналогами [19, с. 45], забезпечує значну інтенсифікацію процесів сепарації суспензії Mg(OH)₂. Спосіб може бути використаний для отримання високочистого MgO з концентрованих магнійвмісних розчинів: хлормagneзних розчинів, які отримують підземним вилуговуванням природного бішофіту; калійних лугів, що утворюються під час вилуговування карналіту; хлормagneзних розсолів, що утворюються при видобуванні натрій сульфату, тощо.

Список літератури:

1. Бондаренко М. П. Розповсюджені елементи та їх сполуки в хімії будівельних матеріалів : навч. посіб. Алчевськ : ДонДТУ, 2013. 184 с.
2. Ковальчук І. А. Нові керамічні матеріали і методи їх синтезу : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 198 с.
3. Ханюков О. О. та ін. Вивчення клінічної ефективності та безпеки комбінованого препарату калію та магнію в комплексному лікуванні хворих з ішемічною хворобою серця, порушеннями ритму серця та хронічною серцевою недостатністю. *Перспективи та інновації науки*. 2024. №. 5(39). С. 1411–1424. [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2024-5\(39\)-1411-1424](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2024-5(39)-1411-1424)
4. Tang Z. X. et al. Nanosize MgO as antibacterial agent: preparation and characteristics. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2012. Vol. 29. P. 775–781. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322012000400009>
5. Неймовірний бішофіт – що це таке і з чим його «їдять». URL: <https://surl.li/ltqbta> (дата звернення: 20.01.2025).
6. Kristova P. et al. Carbonate mineral paragenesis and reaction kinetics in the system MgO–CaO–CO₂–H₂O in presence of chloride or nitrate ions at near surface ambient temperatures. *Applied geochemistry*. 2014. Vol. 50. P. 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.08.005>
7. Shortt I. et al. Growth and Transformation of Hydrated Magnesium Carbonates under Near-Ambient Conditions. *Crystal Growth and Design*. 2024. Vol. 24. No. 24. P. 10193–10202. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.4c01071>

8. Sorte E. G., Rimsza J. M., Alam T. M. Computational and experimental ^1H -NMR study of hydrated Mg-based minerals. *Molecules*. 2020. Vol. 25. No. 4. P. 933. <https://doi.org/10.3390/molecules25040933>
9. Vágvölgyi V. et al. Controlled rate thermal analysis of hydromagnesite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2008. Vol. 92. No. 3. P. 893–897. <https://doi.org/10.1007/s10973-007-8845-6>
10. Lv Y. et al. Investigation of Crystallization Growth Characteristics of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ Crystals under Unconstrained Conditions. *Materials*. 2024. Vol. 17. No. 9. P. 1956. <https://doi.org/10.3390/ma17091956>
11. Sinhamahapatra S. et al. Magnesium aluminate spinel: structure, properties, synthesis and applications. *Transactions of the Indian Ceramic Society*. 2022. Vol. 81. No. 3. P. 97–120. <https://doi.org/10.1080/0371750X.2022.2137701>
12. Salomão R., Arruda C. C., Antunes M. L. P. Synthesis, dehydroxylation and sintering of porous $\text{Mg}(\text{OH})_2$ -MgO clusters: evolution of microstructure and physical properties. *Interceram-International Ceramic Review*. 2020. Vol. 69. No. 1. P. 52–62. <https://doi.org/10.1007/s42411-019-0067-y>
13. Pilarska A. A., Klapiszewski Ł., Jesionowski T. Recent development in the synthesis, modification and application of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ and MgO: A review. *Powder Technology*. 2017. Vol. 319. P. 373–407. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.07.009>
14. Сичов М. І., Коломієць Л. В., Боряк К. Ф. Вивчення умов отримання сполук магнію особливої чистоти з його хлориду. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. 2017. №. 1. С. 10–14. <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2017-1-10-10-14>
15. Сичов М. І. Особливості осадоутворення гідроксиду магнію при направленому гідролізі в розчинах хлориду магнію. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. 2021. №. 1(18). С. 6–14. <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2021-1-18-6-14>
16. Mironyuk I. F. et al. Magnesia formed on calcination of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ prepared from natural bischofite. *Applied Surface Science*. 2006. Vol. 252. No. 12. P. 4071–4082. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.06.020>
17. Мазурак О. Т., Шкумбатьок Р. С., Лень Ю. Т. Практикум лабораторний «Хімія. Частина – аналітична хімія: якісний аналіз»: навч. посіб. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024. 71 с.
18. Сучасні методи кондиціонування та очищення води: лабораторний практикум / Уклад.: Т. Є. Мітченко, І. В. Косогіна. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 122 с.
19. Sichov M., Boryak K., Kolomiets L. Technology for Obtaining Highpure Magnesium Compounds Using the Hydrolytic Processes of Sedimentation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 1. №. 6. С. 43–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253544>

Shokota M. Yu., Kravchenko O. V., Gulyayev V. M., Kovalenko A. L. RESEARCH AND IMPROVEMENT OF THE PROCESS OF PRODUCING MAGNESIUM OXIDE FROM MAGNESIUM CHLORIDE SOLUTIONS USING THE AMMONIA SCHEME

To ensure the possibility of using magnesium chloride solutions and bischofite-type brines for the production of high-quality magnesium oxide, it is necessary to study and improve the process of obtaining MgO from MgCl_2 using ammonium-containing reagents. In this study, four modes of MgO production according to the so-called “ammonia scheme” using an ammonium chloride solution were experimentally tested. The results of the study of the effect of NH_4Cl solution concentration on the precipitation of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ from model solutions of MgCl_2 and a solution of natural bischofite from the Zaturinsky deposit in the Poltava region are presented. The improved method for obtaining MgO included treatment of the chlorine-magnesium solution with gaseous ammonia or ammonium hydroxide in the presence of NH_4Cl in solution at a concentration of $\leq 200 \text{ g/dm}^3$, separation, washing, and calcination of the precipitate at $900\text{--}1200^\circ\text{C}$. It has been established that the use of NH_4Cl as a precipitating agent can significantly increase the rate of crystallization of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ and filtration of the resulting suspension. Because of the use of NH_4Cl , samples of magnesium oxide of high purity met the requirements of national quality standards for use in various industries, including medicine. The technical feasibility of using NH_4Cl as a precipitator for $\text{Mg}(\text{OH})_2$ was proven, which ensured an overall conversion rate of MgCl_2 to MgO of more than 99 %. It was found that ammonium chloride accelerated the crystallization processes and the formation of a dense hydroxide precipitate structure that was well-filtered. Optimal conditions for the introduction of ammonium-containing reagents into the solution for the maximum precipitation of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ were developed. The possibility of reusing the mother liquor and regenerating ammonia was demonstrated. The improved technique is practically waste-free; all reagents are used in a closed cycle, which increases the rate of settling of suspensions and also contributes to the compaction of the sediment and reduction of its volume. The obtained results make it possible to intensify the process of obtaining high-purity MgO with low chlorine content ($< 0.1\%$) from natural sources, particularly bischofite.

Key words: magnesium oxide, magnesium hydroxide, precipitation, filtration, crystallization, bischofite, chlorine.