

DOI: 10.31319/2519-2884.47.2025.20

УДК 661.83:504.05:338.45

Коваленко А.Л., к.х.н., доцент, ORCID: 0000-0003-1496-6634,

e-mail: alla.kovalenko.1948@gmail.com

Кравченко О.В., д.т.н., професор, ORCID: 0009-0006-8833-3441,

e-mail: alkravchenko59@gmail.com

Шокота М.Д., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти

e-mail: mshokota2000@gmail.com

Шумило К.П., здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

e-mail: kate45633@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Kovalenko Alla, Candidate of chemical sciences, Associate Professor of the Department of Chemical and Biological Technologies

Kravchenko Oleksandr, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Chemical and Biological Technologies

Shokota Mikhail, Postgraduate student

Shumylo Kateryna, master's degree student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ЕКОЛОГІЧНО-ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВИДОБУТКУ МАГНІЙ ОКСИДУ З БІШОФІТУ

Зростання технологій створює нові можливості для використання магнію та його сполук, зокрема, магній оксиду (MgO). Застосування MgO є важливим для вогнетривких матеріалів, очищення стічних вод, сільського господарства, медицини. В статті розглянуто основні методи отримання магній оксиду з бішофіту зокрема, піроліз і карбонізація, що має екологічні переваги в порівнянні з іншими джерелами. Основними ризиками є виділення хлору під час піролізу, що потребують ефективних методів утилізації. Вартість енергії є важливим фактором для зниження витрат та вигідне використання побічних продуктів (магній карбонат, хлор). Досліджено прогноз ринку: з 2022 року оцінка світового ринку MgO становила 5,13 млрд доларів США, з прогнозованим зростанням до 7,55 млрд доларів США до 2030 року. Спрогнозовано, що обсяг світового ринку до 2030 року зросте до 22.6 млн. тонн.

Ключові слова: магній (Mg) та його сполуки; інноваційні технології; бішофіт; екологічні та економічні аспекти; карбонізація; ринкова вартість та прогнози.

The growth of technologies creates new opportunities for the use of magnesium and its compounds, particularly magnesium oxide (MgO). The application of MgO is crucial in refractory materials, wastewater treatment, agriculture, and medicine. The article examines the main methods for producing magnesium oxide from bischofite, specifically pyrolysis and carbonation, which offer ecological advantages compared to other sources. The primary risks include chlorine release during pyrolysis, which requires efficient disposal methods. Energy costs are a key factor in reducing expenses and optimizing the use of by-products (magnesium carbonate, chlorine). Market forecasts have been explored: as of 2022, the global MgO market was valued at 5.13 billion USD, with an expected growth to 7.55 billion USD by 2030. It is projected that the global market volume will reach 22.6 million tons by 2030.

Keywords: magnesium (Mg) and its compounds; innovative technologies; bischofite; ecological and economic aspects; carbonation; market value and forecasts.

Постановка проблеми

Зростання розвитку технологій створює можливості для використання нових, інноваційних та відпрацьованих матеріалів. Ці матеріали можна пристосувати до правильного поєднання мікроструктури та властивостей для інноваційних рішень суспільних проблем. Один із

цих матеріалів, магній та його сполуки, з початку 2000 року знайшли широке застосування в галузі охорони здоров'я [1].

Використання MgO поступово привертає увагу майже в кожному застосуванні. Актуальним є використання MgO для вогнетривких та акумуляторних матеріалів, очищення стічних вод, сільськогосподарської діяльності, фотокаталізу, адсорбенту токсичних газів і багатьох життєво важливих програм. Також не можна ігнорувати медичне значення MgO. Його все більше використовують в якості безрецептурного безпечного препарату, в зв'язку з різким збільшенням попиту на нього.

MgO отримують, зокрема, з їхніх рудних тіл (магнезит, доломіт, брусит і олівін). Однак універсального доступу до цих ресурсів немає, оскільки вони, як правило, зосереджені лише в деяких регіонах світу. Рудні тіла в основному зосереджені в кількох країнах Азії, Європи, Північної та Південної Америки, морська вода/розсіл недоступна для територій, які не мають виходу до моря, тому потрібні інші джерела виробництва MgO, щоб доповнити прогнозований високий попит на MgO. Тут постає актуальним отримання магній оксиду з бішофіту, та дослідження екологічних та економічних аспектів його видобутку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Кілька матеріалів, включаючи оксиди металів мають унікальні функціональні можливості та застосування в багатьох областях [2]. В результаті зросло використання магнію та його сполук, що вимагає збільшення його виробництва. Магній оксид (MgO) є одним із найважливіших неорганічних оксидів у сфері управління відходами та токсичністю [3].

Дослідження показали, що низька концентрація магнію в морській воді (~1,3 г/см³) створює проблеми під час його синтезу. Вилучення MgO з морської сировини негативно впливає на навколишнє середовище. Крім того, синтез MgO з цих джерел не зміг створити необхідні кількості в усьому світі. Тому дослідники знаходять альтернативні шляхи збільшення виробництва магнію та його сполук з альтернативної сировини, щоб задовольнити їхній постійно зростаючий попит. Ціна на MgO зростає на світовому ринку через те, що попит перевищує пропозицію MgO [4]. Таким чином, у виробництві MgO існує велика дослідницька ініціатива, щоб зробити продукт доступним для його постійного використання в низько технологічних програмах. Фернандес [5] прогнозує щорічне зростання виробництва на 1,5 % у період з 2020 по 2029 рік. Зараз ведеться багато досліджень, щоб усунути розрив між попитом і пропозицією, а отже, зростання світових цін.

Оксиди металів мають великий потенціал для відновлення миш'яку з води. Загалом, оксиди металів демонструють вищу здатність до видалення As(V) [6]. В останні роки розробляються процеси виробництва магній оксиду, починаючи з водних розчинів, що містять іони магнію, наприклад, морської води. Ці способи, починаючи з морської води, включають осадження під час першої стадії гідратації магній оксиду та/або магній карбонату. У недавній спробі отримати Mg(OH)₂ безпосередньо з морської води кальцинований доломіт (CaO–MgO) використовувався як осаджувач, який реагує з хлоридом магнію в морській воді відповідно до реакції 1:



Незважаючи на те, що цей процес дає перевагу збільшення виходу магній оксиду з заданого об'єму морської води, він все одно вимагає великої кількості доломіту, чого хотілося б уникнути [7].

Магній оксид використовується в промисловості очищення стічних вод для фільтрації зважених твердих речовин і осадження розчинених важких металів. Оскільки рН нульової точки заряду становить 12,4, магній оксид використовувався як аніонний адсорбент через сприятливе електростатичне притягання, яке забезпечується атомом Mg [8]. Як приклад, у попередніх дослідженнях магнезійні мінерали та матеріали використовувалися для адсорбції миш'яку [9]. Крім того, магній оксид міг би адсорбувати фосфор з мінімальним впливом на навколишнє середовище та утворенням шкідливих побічних продуктів завдяки малому іонному радіусу та високій щільності заряду атомів магнію. Наночастинки магній оксиду недорогі, демонструють достатню кількість поверхневих реактивних центрів і ізованих гідроксильних груп, а також виявляють високу спорідненість до адсорбції негативно заряджених іонів фосфату [10]. Магній

оксид є найбільш перспективним аніоном для видалення іонів забруднюючих речовин, таких як фторид (F^-) і борат ($B(OH)_4^-$) [11].

Більшість досліджень адсорбції, пов'язаних з магній оксидом, пов'язані з процесом прожарювання через температурно-залежну структуру матеріалу. Вважається, що температура прожарювання відіграє основну роль у визначенні структури поверхні та фізико-хімічних властивостей цього матеріалу, які відповідають за його загальні характеристики. Поряд зі зміною поверхні магній оксиду від гладкої зовнішньої форми до структури, що складається з нанорозмірних зерен, кристалічна структура також еволюціонувала від мезокристалічної до полікристалічної, потім до псевдоморфної та, нарешті, до кубічного монокристала з підвищенням температури прожарювання в діапазоні 400—1000 °C [12].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є дослідження еколого-економічних аспектів отримання магній оксиду з бішофіту $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ та аналіз сучасних технологій з отриманням супутніх продуктів реакції.

Виклад основного матеріалу

Одним з найпоширеніших методів отримання магній оксиду з бішофіту є піроліз (термічний розклад). У цьому процесі бішофіт нагрівають до високих температур, виділяючи воду і хлор. Продукт реакції містить магній хлорид, який можна переробити для отримання магній оксиду.

Магній карбонат ($MgCO_3$) можна додатково переробляти для отримання магній оксиду, а також використовувати для виробництва побічних продуктів.

Електроліз магній хлориду — ще один ефективний метод отримання магній оксиду. У цьому методі магній хлорид розчиняють у рідкому середовищі, а магній і хлор розділяють за допомогою електричного струму. Цей метод дає дуже чистий магній оксид, але споживає велику кількість енергії, оскільки для розчинення магній хлориду необхідно підтримувати високу температуру.

Під час виробництва магній оксиду з бішофіту утворюються різні побічні продукти. Одним з найважливіших з них є хлор (Cl_2), який є токсичним і може завдати шкоди навколишньому середовищу, якщо його належним чином не утилізувати.

Хлор є важливим побічним продуктом процесів піролізу та карбонізації. У хімічній промисловості він може бути використаний для синтезу низки хімічних речовин, зокрема полівінілхлориду (ПВХ) та гіпохлориту натрію. Однак цей продукт потребує подальшої переробки, щоб зменшити його вплив на навколишнє середовище.

Магній карбонат, отриманий шляхом карбонізації, широко використовується у вогнетривкому виробництві, як наповнювач у фармацевтиці та косметичці, а також у медицині. Деякі процеси дають побічні продукти, такі як вода і різні сполуки кальцію і натрію, які можна використовувати для очищення стічних вод і у виробництві будівельних матеріалів.

Виробництво магній оксиду з бішофіту має як екологічні переваги, так і виклики.

З одного боку, використання бішофіту як сировини зменшує навантаження на інші магнієві ресурси, такі як магнезит ($MgCO_3$) та солі, що видобуваються з природних джерел, а з іншого боку, процес має свої екологічні переваги.

1. Екологічні ризики

Одним з основних екологічних ризиків, пов'язаних з піролізом бішофіту ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$), є виділення хлору (Cl_2), що негативно впливає на довкілля. Хлор токсичний для живих організмів і, потрапляючи в атмосферу, спричиняє забруднення повітря та води, негативно впливає на рослини і тварин. З огляду на ці ризики, для контролю викидів хлору необхідно використовувати ефективні технології, такі як фільтрація та абсорбція хлору: спеціалізовані фільтри та хімічні поглиначі використовуються для уловлювання та перетворення хлору в екологічно безпечні сполуки (наприклад, кальцій хлорид, $CaCl_2$).

Використання хлору в промислових процесах: регенерований хлор можна використовувати для синтезу інших хімічних речовин, таких як полівінілхлорид (ПВХ), таким чином замикаючи виробничий цикл і мінімізуючи викиди.

Процес виробництва магній оксиду з бішофіту вимагає значних витрат енергії, зокрема, піролізу та електролізу. Високі температури, необхідні для розкладання або електролізу магній

хлориду, призводять до високих потреб в енергії і часто призводять до збільшення викидів вуглекислого газу (CO_2), якщо тільки джерело енергії не є відновлюваним.

Існують способи мінімізувати витрати на енергію: використання відновлюваних джерел енергії: системи, що використовують сонячну, вітрову або геотермальну енергію, можуть зменшити викиди парникових газів і зменшити екологічний слід. Підвищення енергоефективності: встановлення сучасної ізоляції та технологій для зменшення втрат енергії, а також використання теплообмінників для рециркуляції тепла.

У процесі виробництва магній оксиду утворюються побічні продукти, такі як вода, солі кальцію та натрію, а також хлор, які можуть забруднювати довкілля. Вони мають потенціал забруднювати навколишнє середовище.

Наприклад, в процесі карбонізації може утворюватися магній карбонат (MgCO_3), який є цінним побічним продуктом, якщо не використовується в подальших виробничих процесах, але його важко утилізувати, особливо якщо системи управління відходами недосконалі.

2. Економічні міркування

Витрати на сировину бішофіту є легкодоступним і відносно дешевим джерелом магнію в порівнянні з іншими джерелами, такими як магнезит (MgCO_3) і магній з морської води. Він містить близько 40–45 % магнію і є перспективною сировиною для промислового виробництва магній оксиду. На відміну від неї, магнезит є дорожчим через додаткові етапи збагачення та переробки. Морська вода має низьку концентрацію магнію, а це означає, що потрібно обробляти велику кількість води, що збільшує витрати. Використання бішофіту знижує витрати на сировину і позитивно впливає на вартість кінцевого продукту.

Енергетичні витрати. Високі енергетичні витрати, особливо на піроліз і електроліз, збільшують загальну вартість виробництва магній оксиду. У той же час, витрати на енергію можна значно знизити за рахунок оптимізації процесу, використання відновлюваних джерел енергії та енергоефективних технологій.

Енергоефективність є важливим економічним фактором, оскільки нижчі витрати на енергію безпосередньо пов'язані зі зниженням собівартості продукції. Сучасні технології, такі як електроліз і карбонізація, вимагають значних інвестицій на початкових етапах, але є прибутковими в довгостроковій перспективі.

Ринки збуту побічних продуктів Важливим економічним аспектом є можливість отримання товарних побічних продуктів. До них відносяться: магній карбонат (MgCO_3): широко використовується у фармацевтичній, косметичній та харчовій промисловості, а також у виробництві вогнетривів.

Бішофіт, мінерал класу галогенідів з формулою $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, найчастіше трапляється як кристалогідрат $\text{Mg}(\text{H}_2\text{O})_6\text{Cl}_2$ у пластах. Цей безбарвний кристалічний матеріал, переважно у вигляді зернистих або волокнистих скупчень, має низьку твердість та високу гігроскопічність. Розчинність бішофіту у воді велика і зростає з температурою, що супроводжується виділенням тепла. Показник розчинності у воді коливається від 1670 г/л до 3670 г/л при температурі 70–80°C. На території України розташовуються значні запаси корисних копалин (табл. 1), в тому числі і родовища бішофіту на території Полтавської області в селищі Закрутине.

Таблиця 1. Родовища бішофіту у світі за основними якісними показниками

	Родовище бішофіту			
	Україна (с. Закрутине)	Німеччина (Штасфурт)	Нідерланди (Цехштейн)	Туркменістан
Мінералізація	402	395	387	376
Mg	103	87	92	79
Br	3,7	3,2	3,2	3,3
I	0,65	0,52	0,53	0,51
K	8,98	7,03	6,98	5,02
Ca	2,01	1,03	1,05	2,03

Фізико-хімічні характеристики якості бішофіту Закрутинського: густина при 20°C, кг/м³, щонайменше 1250, загальна мінералізація, кг/м³, щонайменше 320; розчинність у воді: розчин демонструє високу гігроскопічність, масова частка, %: іонів магнію не менше 6,1; магній хлориду MgCl₂, не менше 24,0; натрій хлориду NaCl, не більше 5,00, сульфат-іонів SO₄, не більше 1,00, кальцій хлориду CaCl₂, не більше 0,50, нерозчинного у воді залишку, не більше 0,20.

Завдяки значній концентрації солей та мікроелементів, передбачається, що введення заздалегідь обробленого бішофіту в грануляційну вежу під час виробництва гранульованих мінеральних добрив сприятиме збагаченню добрива необхідними складовими. Це, у свою чергу, відкриває можливості для створення мінеральних добрив, які містять мікроелементи, що підвищить конкурентну позицію вітчизняних виробників добрив. Вивчення якості мінеральних добрив, збагачених мікроелементами бішофіту, є актуальним та виправданим з економічної точки зору.

Після вивчення фізико-хімічних особливостей процесу виділення іонів магнію з бішофіту з використанням натрій гідроксиду, було визначено ключові параметри проведення синтезу. У зв'язку з цим запропоновано провести синтез магній оксиду з бішофіту з часом синтезу 1,5 години, використовуючи інші реагенти. Для виділення магнієвмісної солі з розчину бішофіту буде здійснено два експерименти з застосуванням амоній карбонату та амоній фосфату. Хлор (Cl₂): використовується в хімічній промисловості для виробництва різних сполук, таких як ПВХ і натрій гіпохлорит, а також може застосовуватися для очищення води.

Карбонатний метод: після додавання амоніак карбонату і доведення рН до заданих значень осадження не спостерігається і розчин залишається прозорим.

Фосфатний метод: початковий рН розчину розведеного 1:100 дорівнював 7,58. Зміна значень рН після додавання амоніаку наведена на рис. 1.

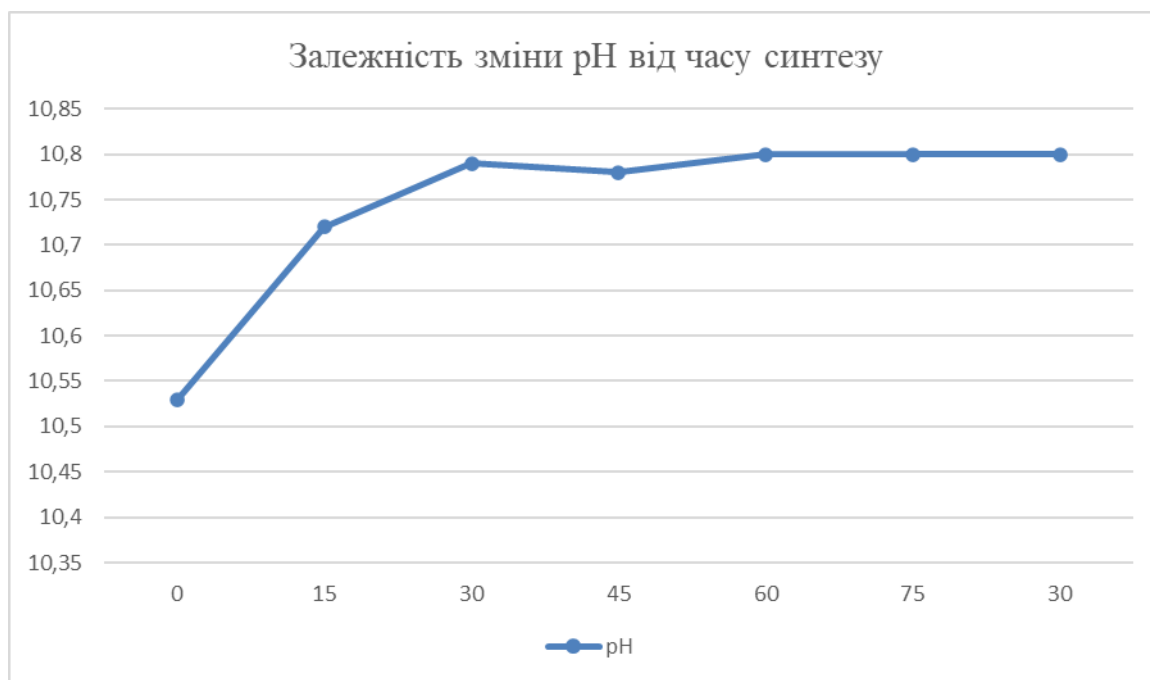


Рис. 1. Залежність зміни рН від часу синтезу

Білий крупнокристалічний осад магній ортофосфату, отриманого в процесі синтезу осідає на дно з великою швидкістю. Отримати кінетичні залежності ущільнення не можливо, час осадження до 31 секунди.

Економічні вигоди реалізуються, якщо відходи та побічні продукти належним чином переробляються та використовуються в інших галузях промисловості. Наприклад, утилізація хлору та використання магній карбонату може зменшити витрати на утилізацію екологічних відходів.

У 2022 році світовий ринок магній оксиду оцінювався приблизно в 5,13 мільярда доларів США. До 2030 року світова ринкова вартість цієї неорганічної солі, за прогнозами, зросте

приблизно до 7,55 мільярдів доларів США. Тим часом у 2022 році обсяг ринку магній оксиду становив приблизно 15,18 мільйона метричних тонн (рис. 2).



Рис. 2. Ринкова вартість MgO у мільярдах доларів США з 2015 по 2025 роки, та прогноз до 2030 року

Світовий обсяг ринку магній оксиду (MgO) в 2022 році становив приблизно 15,18 млн. метричних тонн. Прогнозується, що до 2030 року ця цифра зросте приблизно до 22,6 мільйонів метричних тонн (рис. 3).

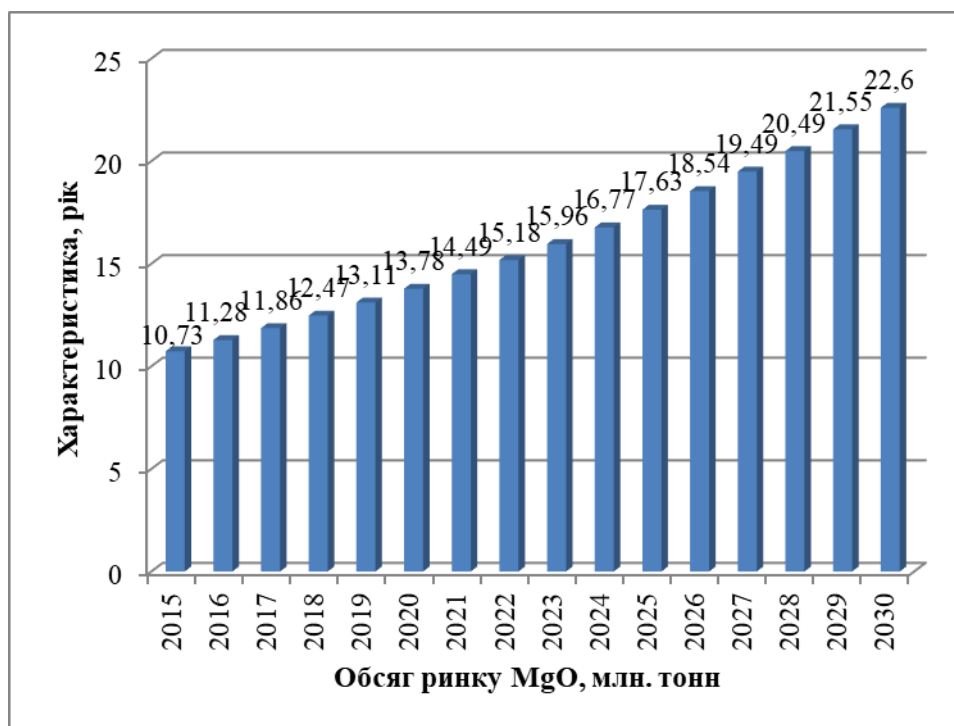


Рис. 3. Світовий обсяг MgO з 2015 по 2025 роки, та прогноз до 2030 року

Дослідження статистики світового обсягу магній оксиду дає можливість спрогнозувати його потенціал до 2030 року. За результатами дослідження отримання магній оксиду з бішофіту є економічно та екологічно вигідним виробництвом, при дотриманні заходів безпеки.

Висновки

1. Виробництво магній оксиду з бішофітів має як екологічні та економічні переваги, так і виклики: з екологічної точки зору, воно вимагає значних зусиль для ефективного використання побічних продуктів (хлору, солей) та скорочення викидів CO₂. З екологічної точки зору, необхідні значні зусилля для ефективного використання побічних продуктів (хлору, солей) і скорочення викидів CO₂; використання відновлюваних джерел енергії та сучасних технологій очищення є важливим для зменшення впливу на навколишнє середовище. Використання бісульфіту є вигідним завдяки доступності сировини та потенціалу прибуткових побічних продуктів.

2. Завдяки значній концентрації солей та мікроелементів, передбачається, що введення заздалегідь обробленого бішофіту в грануляційну вежу під час виробництва гранульованих мінеральних добрив сприятиме збагаченню добрива необхідними складовими. Після аналізу фізико-хімічних властивостей процесу вилучення іонів магнію з бішофіту із застосуванням натрій гідроксиду, виокремлено визначальні параметри здійснення синтезу.

3. Запропоновано провести синтез магній оксиду з бішофіту із тривалістю синтезу 1,5 години, використовуючи інші реагенти. Для вилучення магнієвмісної солі з розчину бішофіту було проведено два експерименти з використанням амоній карбонату та амоній фосфату. Карбонатний метод: після додавання амоній карбонату та досягнення заданого pH, осадження не зафіксовано, а розчин зберігає прозорість. Фосфатний метод: вихідне значення pH розчину, розведеного у співвідношенні 1:100, становило 7,58.

4. Через високі витрати на енергію та початкові інвестиції в технологію необхідний подальший економічний аналіз для визначення доцільності цього процесу. Загалом, інновації у виробництві магній оксиду з бішофіту є перспективними для майбутнього використання цього процесу, оскільки вони можуть значно зменшити негативний вплив на навколишнє середовище та підвищити економічну ефективність.

5. У 2022 році обсяг світового ринку магній оксиду становив приблизно 15,18 млн тонн. За оцінками, до 2030 року цей показник збільшиться приблизно до 22,6 млн тонн. Дослідження світової статистики магній оксиду дає змогу оцінити потенціал до 2030 року. Згідно з цим дослідженням, виробництво магній оксиду з бішофіту є економічно та екологічно життєздатним за умови дотримання заходів безпеки.

Список використаної літератури

1. Tran Q. M., Thinguyen H. A., Doan V.D., Tran Q.H., Nguyen V. C., Young S. J. (2021) Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using aqueous piper betle leaf extract and its application in surgical sutures. *Journal of Nanomaterials*. P.1–15.
2. Dehghan Z., Ranjbar M., Govahi M., Khakdan F. Green synthesis of Ag/Fe₃O₄ nanocomposite utilizing eryngium planum Leaf extract and its potential applications in medicine. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, URL: <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2021.102941> (дата звернення: 11.01.2025).
3. Synthesis, properties, and selected technical applications of magnesium oxide nanoparticles: A review. *International Journal of Molecular Sciences*. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms222312752> (дата звернення: 11.01.2025).
4. Fouda A., Hassan S. Saied E., Hamza M. F. (2021) Photocatalytic degradation of real textile and tannery effluent using biosynthesized magnesium oxide nanoparticles (MgO-NPs), heavy metal adsorption, phytotoxicity, and antimicrobial activity. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Vol.9 № 4. P.105–126 URL: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105346> (дата звернення: 11.01.2025).
5. Nobre J., Ahmed H., Bravo M., Evangelista L., Brito D.E. (2020), Magnesia (MgO) production and characterization, and its influence on the performance of cementitious materials: A review. *Materials*. T.13 No 21, P.47–52. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13214752>

6. Global magnesium oxide market volume 2015-2029. Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/1310514/magnesium-oxide-market-volume-worldwide/> (дата звернення: 12.01.2025).
7. Gupta A.; Chauhan V.S.; Sankararamkrishnan N. (2009) Preparation and evaluation of iron-chitosan composites for removal of As(III) and As(V) from arsenic contaminated real life groundwater. *Water*. Vol. 43, P. 3862–3870. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0375/13/5/475#B16-membranes-13-00475> (дата звернення: 15.01.2025).
8. Process for the production of Magnesium oxide from brine or bittern. пат. US 4370422A USA. № 216,810; заявл. 16.12.1980, опубл. 25.01.1983. Бюл. № 4. 8с.
9. Song Z.; Chen L.; Yang H.; Li J.; Richards R. (2010) Adsorption Properties of MgO (111) Nanoplates for the Dye Pollutants from Wastewater. *J. Chem. Eng. Data*. Vol. 55. No 1. P. 3742–3748. DOI: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/je100274e> (дата звернення: 15.04.2025).
10. Guo L.; Lei R.; Zhang T.C.; Du D.; Zhan W. (2022) Insight into the role and mechanism of polysaccharide in polymorphous magnesium oxide nanoparticle synthesis for arsenate removal. *Chemosphere.*, № 296. P.133–143. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133878> (дата звернення: 15.04.2025).
11. Li R.; Wang J.J.; Zhou B.; Zhang Z.; Liu S.; Lei S.; Xiao R. (2017). Simultaneous capture removal of phosphate, ammonium and organic substances by MgO impregnated biochar and its potential use in swine wastewater treatment. № 147. P.96–107. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.069> (дата звернення: 15.04.2025).
12. Sasaki K.; Fukumoto N.; Moriyama S.; Yu Q.; Hirajima T. (2012). Chemical regeneration of magnesium oxide used as a sorbent for fluoride. *Sep. Purif. Technol.* Vol. 98, P.24–30. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.07.028> (дата звернення: 15.04.2025).
13. Zhang X.; Zheng Y.; Feng X.; Han X.; Bai Z.; Zhang Z. (2015). Calcination temperature-dependent surface structure and physicochemical properties of magnesium oxide. *RSC Adv.* Vol. 5, No 86 P.102–112. URL: <https://doi.org/10.1039/C5RA17031A> (дата звернення: 15.04.2025).

ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC ASPECTS OF MAGNESIUM OXIDE EXTRACTION FROM BISCHOFITE

Abstract

This article explores the environmental and economic aspects of magnesium oxide (MgO) production from bischofite ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) and discusses modern technologies, including the production of reaction by-products. Magnesium and its compounds, particularly MgO, have a wide range of applications in industry, medicine, water treatment, and other sectors, which creates high demand for this material. A significant issue is the lack of universal access to traditional sources of magnesium, such as magnesite and seawater, which necessitates the use of alternative sources like bischofite.

A literature review shows that various methods are employed for MgO production, such as pyrolysis, carbonation, and electrolysis, each with its own environmental and economic advantages and disadvantages. An important challenge is the impact of toxic chlorine released during the decomposition of bischofite on the environment. However, additional economic opportunities arise if chlorine can be converted into useful chemicals, such as polyvinyl chloride.

Economic analysis of MgO production indicates that using bischofite is more cost-effective than other traditional magnesium sources, due to low raw material costs and energy efficiency. It is expected that the demand for MgO will continue to grow steadily over the next few years, which calls for further improvement in production technology. Therefore, magnesium oxide production from bischofite is a promising direction for environmentally friendly and economically efficient production, considering the increasing global demand for this material.

References

- [1] Tran Q. M., Thinguyen H. A., Doan V.D., Tran Q.H., Nguyen V. C., Young S. J. (2021) Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using aqueous piper betle leaf extract and its application in surgical sutures. *Journal of Nanomaterials*. P.1–15.
- [2] Dehghan Z., Ranjbar M., Govahi M., Khakdan F. Green synthesis of Ag/Fe₃O₄ nanocomposite utilizing eryngium planum Leaf extract and its potential applications in medicine. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, URL: <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2021.102941> (дата звернення: 11.01.2025).
- [3] Synthesis, properties, and selected technical applications of magnesium oxide nanoparticles: A review. *International Journal of Molecular Sciences*. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms222312752> (дата звернення: 11.01.2025).
- [4] Fouda A., Hassan S. Saied E, Hamza M. F. (2021) Photocatalytic degradation of real textile and tannery effluent using biosynthesized magnesium oxide nanoparticles (MgO-NPs), heavy metal adsorption, phytotoxicity, and antimicrobial activity. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Vol.9 № 4. P.105–126 URL: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105346> (дата звернення: 11.01.2025).
- [5] Nobre J., Ahmed H., Bravo M., Evangelista L., Brito D.E. (2020),Magnesia (MgO) production and characterization, and its influence on the performance of cementitious materials: A review. *Materials*. T.13 No 21, P.47–52. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13214752>
- [6] Global magnesium oxide market volume 2015-2029. Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/1310514/magnesium-oxide-market-volume-worldwide/> (дата звернення: 12.01.2025).
- [7] Gupta A.; Chauhan V.S.; Sankararamakrishnan N. (2009) Preparation and evaluation of iron–chitosan composites for removal of As(III) and As(V) from arsenic contaminated real life groundwater. *Water*. Vol. 43, P. 3862–3870. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0375/13/5/475#B16-membranes-13-00475> (дата звернення: 15.01.2025).
- [8] Process for the production of Magnesium oxide from brine or bittern. пат. US 4370422A USA. № 216,810; заявл. 16.12.1980, опубл. 25.01.1983. Бюл. № 4. 8с.
- [9] Song Z.; Chen L.; Yang H.; Li J.; Richards R. (2010) Adsorption Properties of MgO (111) Nanoplates for the Dye Pollutants from Wastewater. *J. Chem. Eng. Data*. Vol. 55. No 1. P. 3742–3748. DOI: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/je100274e> (дата звернення: 15.04.2025).
- [10] Guo L.; Lei R.; Zhang T.C.; Du D.; Zhan W. (2022) Insight into the role and mechanism of polysaccharide in polymorphous magnesium oxide nanoparticle synthesis for arsenate removal. *Chemosphere.*, № 296. P.133–143. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133878> (дата звернення: 15.04.2025).
- [11] Li R.; Wang J.J.; Zhou B.; Zhang Z.; Liu S.; Lei S.; Xiao R. (2017). Simultaneous capture removal of phosphate, ammonium and organic substances by MgO impregnated biochar and its potential use in swine wastewater treatment. № 147. P.96–107. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.069> (дата звернення: 15.04.2025).
- [12] Sasaki K.; Fukumoto N.; Moriyama S.; Yu Q.; Hirajima T. (2012). Chemical regeneration of magnesium oxide used as a sorbent for fluoride. *Sep. Purif. Technol*. Vol. 98, P.24–30. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.07.028> (дата звернення: 15.04.2025).
- [13] Zhang X.; Zheng Y.; Feng X.; Han X.; Bai Z.; Zhang Z. (2015). Calcination temperature-dependent surface structure and physicochemical properties of magnesium oxide. *RSC Adv*. Vol. 5, No 86 P.102–112. URL: <https://doi.org/10.1039/C5RA17031A> (дата звернення: 15.04.2025).

Надійшла до редакції 02.07.2025

Прийнята після рецензування 16.10.25

Опублікована 23.10.2025