Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-3-433-441 Оригинальная статья/Research article
УДК 661.846.22; 661.846.23; 544.227 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Влияние природы осадителя и условий прокаливания гидроксида магния на морфологию и адсорбционную активность оксида магния

Елизавета А. Семенова [1] semenovaliza2512@gmail.com 0009-0007-3369-5434
Сергей В. Лановецкий [1] lsv98@mail.ru 0000-0002-2490-1706
Даниил О. Руденко [1] rudenko.d.o@yandex.ru 0009-0006-2807-3705

1 Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр., 29, г. Пермь, 614990, Россия

Аннотация. Методами рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии, термогравиметрии и адсорбционной оценки исследовано влияние типа осадителя (NaOH, NH_4OH, $Ca(OH)_2$), температуры дегидратации и времени прокаливания на фазовый состав, морфологию, размер кристаллитов и поверхностную активность MgO, полученного в процессе термического разложения гидроксида магния, синтезированного из хлоридно-кальциевого рассола. Установлено, что во всех образцах основной фазой является MgO, однако при использовании $Ca(OH)_2$ дополнительно идентифицирован $CaCO_3$ (24,6 мас.%), образование которого обусловлено карбонизацией исходного реагента. Дегидратация $Mg(OH)_2$ протекает в интервале 350–420 ºС с максимумом при 390 ºС, потеря массы составляет 32%, энтальпия процесса – 86,9 кДж/моль. Установлено, что морфология частиц MgO существенно зависит от типа используемого осадителя. Так, при использовании в качестве осадителя раствора NaOH формируются высокопористые агломераты MgO с размером первичных кристаллитов 39–42 нм, введение NH_4OH приводит к образованию хлопьевидных пластинчатых агрегатов с диаметром частиц 44–79 нм, а применения в качестве осадителя $Ca(OH)_2$ способствует синтезу плотных игольчатых структур размером 61–79 нм. Максимальная адсорбционная активность MgO (йодное число) достигается при температуре прокаливания $Mg(OH)_2$ 550 ºС в течение 0,5 ч для всех образцов; наибольшее значение зафиксировано для NaOH (230,4 мг J/г MgO), наименьшее – для $Ca(OH)_2$ (164,7 мг J/г MgO), что связано с блокировкой активных центров карбонатом кальция. Показано, что повышение температуры до 700 ºС и увеличение времени прокаливания приводят к снижению активности оксида магния из-за спекания кристаллических частиц. При этом у известкового образца падение активности минимально (10% против 22–23% для других осадителей), что объясняется ингибирующим действием $CaCO_3$. Результаты исследований могут быть использованы для разработки технологии получения активного MgO из природного хлоридно-кальциевого сырья.

Ключевые слова: оксид магния, гидроксид магния, термическое разложение, адсорбционная активность, хлоридно-кальциевый рассол.

Effect of precipitant nature and calcination conditions of magnesium hydroxide on the morphology and adsorption activity of magnesium oxide

Elizaveta A. Semenova [1] semenovaliza2512@gmail.com 0009-0007-3369-5434
Sergey V. Lanovetskiy [1] lsv98@mail.ru 0000-0002-2490-1706
Daniil O. Rudenko [1] rudenko.d.o@yandex.ru 0009-0006-2807-3705

1 Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky Av., 29, Perm, 614990, Russia

Abstract. The influence of precipitant type (NaOH, NH_4OH, $Ca(OH)_2$), dehydration temperature, and calcination time on the phase composition, morphology, crystallite size, and surface activity of MgO obtained by thermal decomposition of magnesium hydroxide synthesized from chloride–calcium brine was investigated using X-ray diffraction, scanning electron microscopy, thermogravimetry, and adsorption evaluation. MgO was identified as the main phase in all samples; however, when $Ca(OH)_2$ was used, $CaCO_3$ (24.6 wt. %) was additionally detected, its formation being attributed to carbonization of the initial reagent. Dehydration of $Mg(OH)_2$ proceeded in the range of 350–420 ºC with a maximum at 390 ºC, the mass loss was 32 %, and the enthalpy of the process was 86.9 kJ/mol. The morphology of MgO particles was found to depend significantly on the precipitant type. The use of NaOH solution yielded highly porous MgO agglomerates with primary crystallite sizes of 39–42 nm; NH_4OH resulted in flaky, plate-like aggregates with particle diameters of 44–79 nm; and $Ca(OH)_2$ promoted the formation of dense needle-like structures measuring 61–79 nm. Maximum adsorption activity (iodine number) for all samples was achieved at a calcination temperature of 550 °C and a holding time of 0.5 h; the highest value was recorded for NaOH (230.4 mg I_2/g MgO), and the lowest for $Ca(OH)_2$ (164.7 mg I_2/g MgO), which is attributed to the blocking of active sites by calcium carbonate. Raising the temperature to 700 ºC and extending the calcination time led to a decrease in MgO activity due to sintering of crystalline particles. The lime-derived sample exhibited the smallest decrease in activity (10 % versus 22–23 % for the other precipitants), which is explained by the inhibiting effect of $CaCO_3$. The obtained results can be applied in developing a technology for producing active MgO from natural chloride–calcium raw materials.

Keywords: magnesium oxide, magnesium hydroxide, thermal decomposition, adsorption activity, chloride–calcium brine.

Введение

Оксид магния является одним из наиболее востребованных и многофункциональных неорганических материалов, находящих применение в самых разных отраслях промышленности. MgO широко используется в производстве огнеупоров, катализаторов, сорбентов, а также в качестве антибактериального и фотокаталитического материала [1–11]. Основополагающей характеристикой, определяющей эффективность

Для цитирования
Семенова Е.А., Лановецкий С.В., Руденко Д.О. Влияние природы осадителя и условий прокаливания гидроксида магния на морфологию и адсорбционную активность оксида магния // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 3. С. 433–441. doi:10.20914/2310-1202-2026-3-433-441

For citation
Semenova E.A., Lanovetskiy S.V., Rudenko D.O. Effect of precipitant nature and calcination conditions of magnesium hydroxide on the morphology and adsorption activity of magnesium oxide. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 3. pp. 433–441. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-3-433-441

© 2026, Семенова .Е.А. и др. / Semenova E.A. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

MgO в таких сферах, как производство катализаторов и сорбентов, является его поверхностная активность, которая, в свою очередь, напрямую зависит от морфологии частиц, размера кристаллитов, удельной поверхности и пористости материала [10, 12–15].

Традиционно оксид магния получают термической дегидратацией гидроксида магния [13, 16–18]. При этом непосредственно сам процесс прокаливания является завершающим этапом, в ходе которого происходит формирование конечной морфологии готового продукта. Температура и длительность термообработки являются основными управляющими параметрами, определяющими такие характеристики, как размер первичных кристаллитов, степень дефектности решетки и развитость удельной поверхности [12, 15, 19]. Повышение температуры интенсифицирует процесс спекания, приводя к росту кристаллитов и, как следствие, к снижению удельной поверхности и активности [12, 13, 17]. В то же время, слишком низкая температура может не обеспечить полного завершения процесса дегидратации, что также негативно скажется на структуре и свойствах оксида магния [20]. Поиск оптимального баланса между этими процессами является актуальной задачей в технологии синтеза целевого продукта с заданными характеристиками.

Особый интерес представляет получение активного MgO из альтернативных источников сырья, в частности, из природных и техногенных рассолов [8]. Использование хлоридно-кальциевых рассолов, являющихся отходами или побочными продуктами многих химических производств, не только решает экологические задачи утилизации, но и создает экономически целесообразную сырьевую базу [8]. Однако состав таких рассолов сложен и, помимо магния, содержит значительные количества кальция, калия, натрия и других элементов. Процесс осаждения гидроксида магния из таких многокомпонентных систем требует тщательного контроля, чтобы минимизировать соосаждение примесей, которые могут оказывать существенное влияние на свойства целевого продукта [21].

Выбор осадителя для осаждения магния из многокомпонентных рассолов имеет существенное значение. Щелочные реагенты, такие как гидроксид натрия (NaOH), гидроксид аммония (NH_4OH) и гидроксид кальция ($Ca(OH)_2$), обладают различной химической природой и механизмами взаимодействия с ионами магния [12, 13, 16–18]. Это определяет не только чистоту осадка $Mg(OH)_2$, но и его морфологию, размер частиц и дефектность структуры, которые, в свою очередь, наследуются и модифицируются на этапе прокаливания [12, 21, 22]. В то время как NaOH обеспечивает быстрое и количественное осаждение в сильнощелочной среде, а NH4OH позволяет проводить процесс в более мягких условиях с меньшим риском соосаждения, использование $Ca(OH)_2$ является привлекательным с экономической точки зрения, но сопряжено с риском загрязнения продукта карбонатом кальция. Присутствие $CaCO_3$, который не разлагается в интервале температур дегидратации $Mg(OH)_2$, может выступать как в роли ингибитора роста кристаллитов MgO, так и в роли пассивной балластной фазы, снижающей общую активность материала [23, 24].

Несмотря на большое количество публикаций по синтезу MgO и Mg(OH)2 [25–30], системные исследования, охватывающие влияние состава рассола, типа осадителя, условий осаждения, параметры процесса дегидратации и свойства синтезируемого продукта, особенно для сложных хлоридно-кальциевых систем, остаются недостаточно изучены. В литературе не хватает данных о комплексном влиянии температуры и времени обжига на морфологию и активность MgO, полученного из одного и того же сырья, но с использованием разных осадителей. Это создает неопределенность при выборе оптимальной технологической схемы переработки рассолов и не позволяет прогнозировать свойства конечного продукта для конкретных сфер применения.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы является исследования влияния температуры и длительности прокаливания $Mg(OH)_2$ на фазовый состав, морфологию, размер кристаллитов и адсорбционную активность (по йодному числу) получаемого MgO.

Материалы и методы

Объектом исследования являлся оксид магния (MgO), полученный термической обработкой гидроксида магния. В качестве магнийсодержащего сырья использовали обогащенный хлоридно-кальциевый рассол следующего состава (мас.%): $MgCl_2$ – 10,49%, $CaCl_2$ – 16,53%, KCl – 2,66%, NaCl – 0,18%. Осаждение гидроксида магния $Mg(OH)_2$ проводили при комнатной температуре с использованием трех типов осадителей: 20% раствор гидроксида натрия (NaOH), 25% раствор гидроксида аммония (NH_4 OH) и 10% суспензия гидроксида кальция ($Ca(OH)_2$). Осаждение осуществляли при постоянном перемешивании при помощи вертикальной роторной мешалки с цифровым управлением «WiseStir HT50DX» со скоростью 600 мин$^{-1}$. В процессе осаждения контролировали значение pH, которое не превышало 10, чтобы максимально снизить соосаждение примесей гидроксида и карбоната кальция. Полученные осадки $Mg(OH)_2$ отфильтровывали и многократно промывали дистиллированной водой для удаления

избытка осадителя и побочных солей. Промытые осадки сушили при температуре 150° С до постоянной массы. Исследование прокалки осадка проводили в высокотемпературной муфельной печи марки LHT 04/18.

Процесс дегидратации исходного $Mg(OH)_2$ изучали на дериватографе Thermoscan-2 в атмосфере воздуха. Навеску образца помещали в кварцевый тигель и нагревали со скоростью 10°С/мин в интервале температур от 30 до 600 °С. Одновременно регистрировали кривые ТГ и ДТА. Потерю массы рассчитывали в процентах от исходной навески. Энтальпию дегидратации (ΔН) определяли по площади эндотермического пика на кривой ДТА.

На основании термогравиметрического анализа для оценки влияния термического воздействия на активность оксида магния были выбраны три температуры прокалки высушенного гидроксида магния: 420°С, 550°С и 700°С. При этом длительность прокаливания варьировалась в диапазоне от 0,5 до 4 часов. Полученные образцы оксида магния охлаждали в эксикаторе над силикагелем.

Активность полученного оксида магния оценивали по йодному числу согласно ГОСТ 34445–2018. Данный метод основан на способности MgO адсорбировать йод из его раствора в органическом растворителе. Йодное число выражали в миллиграммах йода, адсорбированного на одном грамме оксида магния (мг J/г MgO).

Для определения состава осадка применялся рентгенофазовый анализ, который выполнялся при помощи рентгеновского дифрактометра XRD-7000 фирмы «Shimadzu» в Cu Kα-излучении (30 кВ, 30 мА). Съемку проводили в интервале 2θ = 5–80° с шагом 0,02° и скоростью 1 град/мин. Обработку рентгенограмм и идентификацию фаз осуществляли с использованием программного обеспечения «XRD 6000/7000 Ver. 5.21». Размер первичных кристаллитов (областей когерентного рассеяния, ОКР) рассчитывали по формуле Шеррера:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta cos\theta}$$

где D – размер кристаллита, Å; K – форм-фактор для сферических частиц, 0,94; λ – длина волны рентгеновского излучения, 1,5406 Å; β – физическое уширение пика на половине его высоты, рад.; θ – угол дифракции рентгеновского излучения, рад.

Расчет β и θ проводили для наиболее интенсивного пика. Полученный размер кристаллитов в ангстремах переводили в нанометры.

Для определения морфологии полученных порошков оксида магния использовали сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения (разрешение 3–10 нм, максимальное увеличение 300000X) «S-3400N» японской фирмы «HITACHI».

Результаты и их обсуждение

Для определения температуры дегидратации гидроксида магния, полученного в результате осаждения аммиачной водой, был проведен термогравиметрический анализ. График зависимости изменения температуры (ДТА) и изменения массы (ТГ) образца от температуры представлен на рисунке 1.

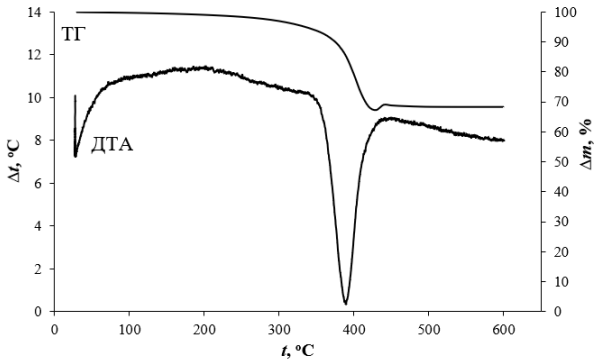


Рисунок. 1 Дериватограмма процесса дегидратации $Mg(OH)_2$

Figure 1. Derivatogram of $Mg(OH)_2$ dehydration

На термограмме фиксировалась плавная потеря массы, соответствующая дегидратации $Mg(OH)_2$ согласно уравнению:

$$Mg(OH)_2 = MgO + H_2O$$

Согласно рисунку установлено, что процесс разложения гидроксида магния, полученного в процессе осаждения ионов магния аммиачной водой, протекал в интервале 350–420 °С.

Начало процесса разложения фиксируется при температуре 350 °С, что соответствует изменению на кривой ТГ и началу эндотермического пика ДТА. Максимум скорости разложения гидроксида магния приходится на температуру 390 °С, что подтверждается минимумом пика эндотермического эффекта, представленном на линии ДТА. При температуре 420 °С масса анализируемой пробы стабилизируется, и линия ТГ выходит на плато.

Теоретическое снижение массы, рассчитанное по уравнению разложения гидроксида магния, составляет 30,9 %. По результатам изменения термограммы, представленной на рисунке, показана фактическая потеря массы образца в 32 %, что свидетельствует о полном разрушение кристаллической решетки $Mg(OH)_2$ с отщеплением гидроксильных групп OH^- (30,9%), а также небольшой потере физически адсорбированной влаги (1,1%).

На основе термограммы проведена оценка теплового эффекта дегидратации гидроксида магния. Пиковое поглощение энергии в интервале 350–390 °С соответствовало интенсивному разложению гидроксида магния. Площадь пика,

определенная по графику, выражена в джоулях и приведена к удельной величине (на один моль вещества), исходя из массы, потерянной в процессе дегидратации. Расчетная энтальпия анализируемого процесса составила 86,9 кДж/моль, что свидетельствует об умеренно эндотермическом характере разложения $Mg(OH)_2$. Полученное значение согласуется с диффузионно-контролируемым механизмом дегидроксилирования с образованием пористого MgO, для которого энергетический барьер определяется преимущественно разрывом связей Mg–OH и переносом молекул воды через слой образующегося оксида магния.

Для идентификации фазового состава полученных образцов был проведен рентгенофазовый анализ (РФА). На рисунке 2 представлены дифрактограммы образцов, полученных с использованием различных осадителей.

Установлено, что во всех образцах основной кристаллической фазой является оксид магния MgO (структура минерала «Periclase», пространственная группа Fm-3m). В образцах, полученных с использованием NaOH и NH_4 OH, дополнительных рефлексов не обнаружено, что свидетельствует о высокой чистоте продуктов.

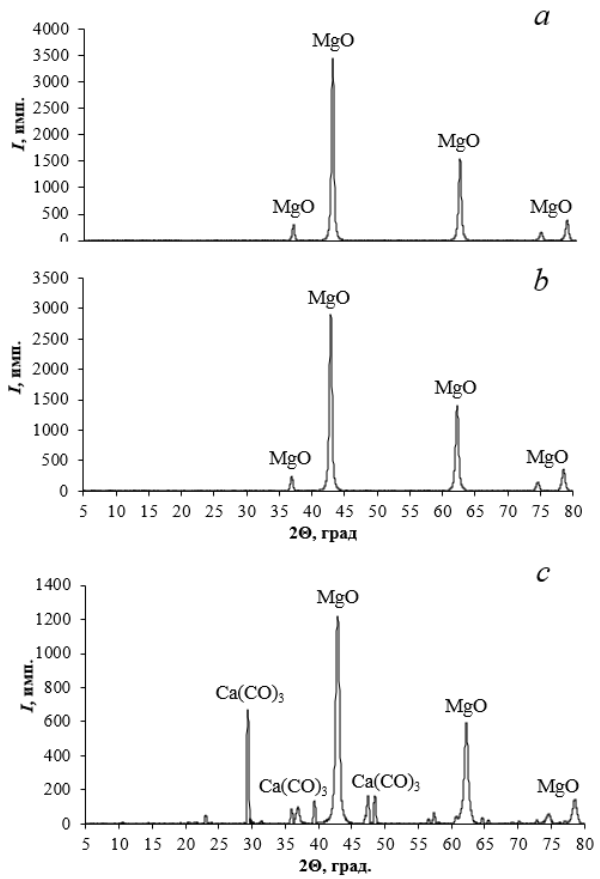


Рисунок. 2 Дифрактограммы образцов: a – MgO-NH_4OH; b – MgO-NaOH; c – MgO-$Ca(OH)_2$

Figure 2. XRD patterns of the samples: a – MgO-NH_4OH; b – MgO-NaOH; c – MgO-$Ca(OH)_2$

При этом в известковом образце, наряду с рефлексами MgO присутствуют дополнительные пики, которые соответствуют карбонату кальция $CaCO_3$ (структура минерала «Calcite», пространственная группа R-3c). Это связано с карбонизацией исходного $Ca(OH)_2$ под действием атмосферного CO_2 в процессе приготовления и хранения образца.

Массовое соотношение фаз в образце, полученном осаждением $Ca(OH)_2$, составляет 75,4% MgO и 24,6% $CaCO_3$. Таким образом, присутствие карбоната кальция является характерной особенностью данного образца, которая, как будет показано далее, оказывает влияние на морфологию, размер кристаллитов и активность MgO.

Для оценки влияния типа осадителя на размер первичных кристаллитов проведен расчет по формуле Шеррера на основе уширения наиболее интенсивного рефлекса (200) расположенного при $2\theta = 42{,}9°$. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица.1

Зависимость размера первичных кристаллитов от типа осадителя

Table.1

Effect of the precipitating agent type on primary crystallite size

Осадитель Precipitator	β, °	Размер *D*, нм Size *D*, nm
NH_4 OH	0,417	21,38
NaOH	0,470	18,96
$Ca(OH)_2$	0,671	13,27

Наименьший размер кристаллитов (13,27 нм) получен для известкового образца. Это объясняется присутствием частиц $CaCO_3$, которые располагаются на границах зерен MgO и препятствуют их росту. В аммиачном и натриевом образце синтезируемого продукта, отсутствуют другие нерастворимые, помимо MgO, соединения, что обеспечивает формирование более крупных первичных кристаллитов – 18,96 нм и 21,38 нм соответственно.

Для анализа морфологии образцов MgO, полученных с использованием различных осадителей при температуре прокалки 550 °C и длительности прокалки 30 мин, использовали сканирующую электронную микроскопию. Микрографии образцов изображены на рисунке 3.

Аммиачный образец (рис. 3a) представлен хлопьевидными агломератами размером 44–79 нм, состоящими из мелких первичных кристаллитов. Хлопьевидная морфология указывает на развитую поверхность, а также наличие межчастичных пор.

Натриевый образец (рисунок 3b), состоит из мелких высокопористых агломератов размером 39–42 нм. Формирование такой структуры обусловлено быстрым осаждением $Mg(OH)_2$ в сильнощелочной среде. На стадии промывки и фильтрации гидроксида магния соединения

натрия полностью удаляются, поэтому при прокаливании отсутствуют дополнительные твердые фазы, которые способны влиять на структуру MgO.

В известковом образце (рисунок 3c) формируются крупные игольчатые агрегаты размером 61–79 нм, состоящие из плотно сросшихся кристаллитов. Это объясняется присутствием в порошке частиц CaCO3 (24,6 мас.%), которые образуются при карбонизации непрореагировавшего с ионами магния $Ca(OH)_2$ на воздухе. В отличие от NaOH и NH_4OH, карбонат кальция не разлагается при 550 °C и остается в составе продукта. С одной стороны, он блокирует рост кристаллитов MgO, обеспечивая минимальный размер ОКР (13,27 нм), а с другой – выступает в качестве связующего компонента, формируя пространственную сетку, в которой кристаллиты MgO соединены между собой через частицы $CaCO_3$.

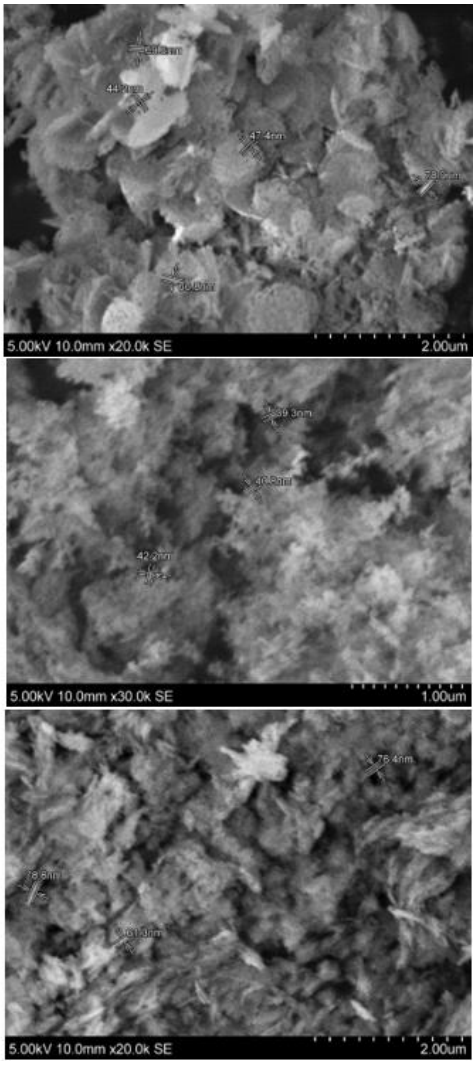


Рисунок. 3 Микрографии образцов оксида магния, полученных при помощи различных осадителей: a – осадитель NH_4OH, b – осадитель NaOH, c – осадитель $Ca(OH)_2$

Figure 3. Micrographs of magnesium oxide samples obtained with different precipitating agents: a – NH_4OH, b – NaOH, c – $Ca(OH)_2$

В соответствии с данными термогравиметрического анализа, указывающими на диапазон разложения гидроксида магния от 350 до 420 °C, выбраны температуры прокалки 420, 550 и 700 °C с продолжительностью 0,5, 1, 2 и 4 часа. В таблице 2 представлена зависимость йодного числа (А) от температуры прокалки для трех типов осадителей.

Таблица.2

Активность MgO в зависимости от температуры прокаливания

Table.2

Effect of calcination temperature on MgO activity

t, ° C	Активность, мг J/г MgO Activity, mg J/g MgO		
	NaOH	NH_4 OH	NaOH
420	93,7	420	93,7
550	216,7	550	216,7

При температуре прокалки 420 °C активность всех образцов низкая, что свидетельствует о том, что, несмотря на завершение дегидратации по данным ТГ, данной температуры недостаточно для формирования высокоактивного MgO.

Максимальная активность достигается при 550 °C для всех типов осадителей. Это соответствует температуре полного завершения дегидратации и формирования развитой поверхности MgO. Наибольшее значение йодного числа получено для натриевого образца (216,7 мг J/г MgO), что согласуется с его наименьшим размером агломератов по данным СЭМ. Аммиачный образец показывает близкое значение (199,2 мг J/г MgO), а наименьшая активность получена для известкового образца (164,7 мг J/г MgO). Активность образца с $Ca(OH)_2$ ниже, так как частицы $CaCO_3$, присутствующие в осадке, блокируют часть активных центров на поверхности MgO.

Дальнейшее повышение температуры прокаливания до 700 °C вызывает снижение активности всех образцов вследствие их спекания. При этом активность образца, осажденного $Ca(OH)_2$, выше, чем у аммиачного и натриевого, поскольку в данном случае примеси кальция играют роль ингибиторов спекания.

Так как наибольшую активность проявили образцы, полученные при температуре 550 °C, определение оптимальной длительности прокалки проводили при данной температуре. На рисунке 4 представлена зависимость йодного числа от времени прокаливания гидроксида магния, полученного осаждением различными реагентами.

Максимальная активность образцов достигается при минимальном времени обжига 30 мин. С увеличением продолжительности температурного воздействия активность монотонно снижается у всех образцов, что связано

с продолжающимся спеканием кристаллитов и как следствие – уменьшением активной поверхности оксида магния.

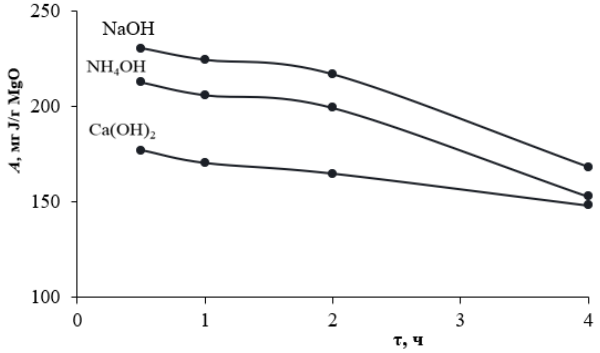


Рисунок. 4 Зависимость активности MgO от длительности прокаливания Mg(OH)2

Figure 4. Effect of $Mg(OH)_2$ calcination time on MgO activity

Наиболее интенсивное падение активности наблюдается в интервале от 2 до 4 часов. Для образца, полученного из $Mg(OH)_2$, осажденного NaOH, снижение составляет 22%, для образца, полученного осаждением NH_4 OH – 23%, а для образца, синтезированного при помощи $Ca(OH)_2$ – 10%. Меньшее снижение активности последнего образца объясняется присутствием частиц $CaCO_3$, которые ограничивают рост кристаллитов и замедляют процесс спекания.

Заключение

В результате исследования установлены закономерности влияния типа осадителя, температуры и времени прокаливания на фазовый состав, морфологию, размер кристаллитов и адсорбционную активность оксида магния, полученного из хлоридно-кальциевого рассола.

Методом РФА показано, что во всех образцах основной фазой является MgO. В образцах, полученных осаждением NaOH и NH_4 OH, примеси отсутствуют, тогда как в образце, осажденном при помощи $Ca(OH)_2$ идентифицирован $CaCO_3$ (24,6 мас.%), образование которого связано с карбонизацией исходного $Ca(OH)_2$ на воздухе.

По данным термогравиметрического анализа установлено, что дегидратация $Mg(OH)_2$ протекает в интервале температур 350–420 °C с максимумом скорости при 390 °C, потеря массы составила 32%, что в целом согласуется с теоретическим значением потери массы при термическом разложении гидроксида магния. Энтальпия дегидратации составила 86,9 кДж/моль.

По формуле Шеррера рассчитан размер первичных кристаллитов. Наименьший размер кристаллитов получен для известкового образца (13,27 нм), что обусловлено наличием частиц $CaCO_3$, которые блокируют рост кристаллитов MgO. В случае NaOH и NH_4 OH, примесные соединения, образованные в процессе осаждения гидроксида магния, полностью удаляются на стадии промывки осадка, поэтому при прокаливании в системе отсутствуют посторонние фазы, и размер кристаллитов составляет 18,96 и 21,38 соответственно.

Методом СЭМ установлено, что морфология частиц оксида магния существенно зависит от типа осадителя. Наиболее пористые агломераты (39–42 нм) формируются при использовании в качестве осадителя NaOH. Аммиачный образец приводит к образованию пластинчатых хлопьевидных агломератов (44–79 нм). В присутствии $Ca(OH)_2$ формируются плотные игольчатые агрегаты (61–79 нм).

Оптимальными условиями получения высокоактивного MgO являются прокалка при 550 °C в течение 0,5 ч. Дальнейшее повышение температуры и увеличение времени прокаливания приводят к снижению активности из-за спекания частиц. Применение NaOH в качестве осадителя позволяет получить продукт с максимальной активностью (230,4 мг J/г MgO) тогда как использование $Ca(OH)_2$ сопровождается снижением активности из-за образования $CaCO_3$.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки технологии получения активного оксида магния из природного хлоридно-кальциевого сырья.

Литература

1 Shi J., Nie J., Yan W. et al. Microstructures and properties of microporous magnesia aggregates from $Mg(OH)_2$ and magnesite // Journal of Asian Ceramic Societies. 2025. V. 13. No 3. P. 213–222. doi: 10.1080/21870764.2025.2530829

2 Podobiński J., Datka J. Basic properties of ZnO, $Ga_2 O_3$, and MgO – quantitative IR studies // Catalysts. 2024. V. 14. P. 106. doi: 10.3390/catal14020106

3 Singh R.J., Kalose S.A., Das S.K. et al. Mesostructured MgO micro-rods as recyclable heterogeneous catalysts for the iodine-mediated synthesis of imidazo[1,2 – a] pyridines // Chemistry Select. 2025. V. 10. P. e04573. doi: 10.1002/slct.202504573

4 Ghane Gardeh M., Kistanov A.A., Nguyen H. et al. Exploring mechanisms of hydration and carbonation of MgO and $Mg(OH)_2$ in reactive magnesium oxide-based cements // Journal of Physical Chemistry C. 2022. V. 126. P. 6196–6206. doi: 10.1021/acs.jpcc.1c10590

5 Halawy S.A., Osman A.I., Nasr M. et al. Mg–O–F nanocomposite catalysts defend against global warming via the efficient, dynamic, and rapid capture of CO_2 at different temperatures under ambient pressure // ACS Omega. 2022. V. 7. P. 38856–38868. doi: 10.1021/acsomega.2c04587

6 Wu S., Lee W.P.C., Thenuwara H.N. et al. Enhancing CO_2 adsorption on MgO: insights into dopant selection and mechanistic pathways // Biomimetics. 2025. V. 10. P. 9. doi: 10.3390/biomimetics10010009

7 Du J. – H., Chen L., Zhang B. et al. Identification of CO_2 adsorption sites on MgO nanosheets by solid-state nuclear magnetic resonance spectroscopy // Nature Communications. 2022. V. 13. P. 707. doi: 10.1038/s41467–022–28405–6

8 Семенова Е.А., Лановецкий С.В. Современные технологии извлечения магния из гидроминеральных источников (обзор) // Южно-Сибирский научный вестник. 2025. Т. 6 № 64. С. 285–296. doi: 10.25699/SSSB.2025.64.6.045.

9 Todan L., Predoană L., Petcu G. et al. Comparative study of MgO nanopowders prepared by different chemical methods // Gels. 2023. V. 9. P. 624. doi: 10.3390/gels9080624

10 Rashid S., Islam S., Qamer S. et al. A review of green synthesized magnesium oxide nanoparticles coated textiles // Journal of Industrial Textiles. 2026. V. 55. doi: 10.1177/15280837251313518

11 Восмериков А.А., Восмерикова Л.Н., Восмериков А.В. Кислотные и каталитические свойства Mg-содержащих цеолитных катализаторов в процессе превращения пропана в олефиновые углеводороды // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. № 11. С. 42–49. doi: 10.6060/ivkkt.20236611.2t.

12 Sadgar A.L., Deore T.S., Jayaram R.V. Pickering interfacial catalysis – Knoevenagel condensation in magnesium oxide-stabilized Pickering emulsion // ACS Omega. 2020. V. 5. P. 12224–12235. doi: 10.1021/acsomega.0c00819

13 Gliński M., Czajka A., Ulkowska U. et al. A hands-on guide to the synthesis of high-purity and high-surface-area magnesium oxide // Catalysts. 2022. V. 12. P. 1595. doi: 10.3390/catal12121595

14 Thomele D., Baumann S.O., Schneider J. et al. Cubes to cubes: organization of MgO particles into one-dimensional and two-dimensional nanostructures // Crystal Growth and Design. 2021. V. 21. P. 4674–4682. doi: 10.1021/acs.cgd.1c00535

15 Lim Y. – T., So S. – Y., Jang H. – S. Effect of calcination temperature on the light burned MgO matrix and its physical properties // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2022. V. 21. No 2. P. 500–510. doi: 10.1080/13467581.2020.1869021

16 Bassioni G., Farid R., Mohamed M. et al. Effect of different parameters on caustic magnesia hydration and magnesium hydroxide rheology: a review // Materials Advances. 2021. V. 2. P. 6519–6531. doi: 10.1039/d0ma00887g

17 Septianingsih L., Dongdong Y., Lina L. et al. Integrated recovery of magnesium from magnesium-rich hydrometallurgical wastewater via precipitation and calcination // Minerals Engineering. 2026. V. 248. P. 110566. doi: 10.1016/j.mineng.2026.110566

18 Ahmed M. Experimental and process simulation study on the production of magnesium hydroxide and magnesium oxide from seawater reverse osmosis brine // Journal of Chemical and Petroleum Engineering. 2026. (in press). doi: 10.22059/jchpe.2026.408620.1695

19 Wang M.J., Li M., Bai L.M. et al. Research on the influence of thermal decomposition of magnesium chloride hexahydrate on the preparation of magnesium oxide and hydrated magnesium hydroxide // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2024. V. 60. No 5. P. 193614. doi: 10.37190/ppmp/193614

20 Hou Q., Li J., Luo X. et al. Development and characterization on the isothermal kinetics of $Mg(OH)_2$-sol synthesized by chemical method // Journal of Asian Ceramic Societies. 2022. V. 10. No 1. P. 130–137. doi: 10.1080/21870764.2021.2019376

21 Rizal M.N., Nurhayati E., Tangahu B.V. et al. Nano-MgO synthesis and characterization using $MgCl_2$ via precipitation method // Dampak. 2025. V. 22. No 2. P. 31–41. doi: 10.25077/dampak.22.2.31–41.2025

22 Rajabimashhadi Z., Naghizadeh R., Zolriasatein A. et al. Novel synthesis of nano $Mg(OH)_2$ by means of hydrothermal method with different surfactants // Nanomaterials. 2023. V. 13. P. 454. doi: 10.3390/nano13030454

23 Song Y., Qu T., Zhang J. et al. Enhancing cyclic stability and anti-sintering capacity of $CaCO_3$-MgO sorbents for CO_2 capture // Chemical Engineering Science. 2025. V. 309. P. 121433. doi: 10.1016/j.ces.2025.121433

24 Singh I., Hay R., Celik K. Recovery and direct carbonation of brucite from desalination reject brine for use as a construction material // Cement and Concrete Research. 2022. V. 152. P. 106673. doi: 10.1016/j.cemconres.2021.106673

25 Luu T. – A., Nguyen A. – Q., Le V. – G. Magnesium recovery from real high strength industrial wastewater via fluidized bed homogeneous granulation process // Journal of Water Process Engineering. 2026. V. 88. P. 110205. doi: 10.1016/j.jwpe.2026.110205

26 Lu T. – K., Lin T. – Y., Huang C. – P. et al. Optimized fluidized bed homogeneous crystallization process for recovering magnesium as granulated magnesium hydroxide from high-salinity water // Separation and Purification Technology. 2025. V. 377. Part 3. P. 134407. doi: 10.1016/j.seppur.2025.134407

27 Liu S., Li Y., Guo H. et al. Preparation of nano-hexagonal flake magnesium hydroxide from seawater brine and the crystallization-based separation of inorganic salt products from the mother liquor // Desalination. 2025. V. 612. P. 118954. doi: 10.1016/j.desal.2025.118954

28 Usman J., Shafi Q.I., Salhi B. et al. Experimental and chemometric insights into sustainable magnesium hydroxide recovery from RO reject brine // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2026. V. 14. No 2. P. 120997. doi: 10.1016/j.jece.2025.120997

29 Senevirathna H.L., Lee W.P.C., Wu S. et al. Transforming desalination brine into highly reactive magnesium oxide and life cycle analysis // Watershed Ecology and the Environment. 2025. V. 7. P. 36–46. doi: 10.1016/j.wsee.2025.01.001

30 Wang Y., Jiang B., Yu H. et al. Porous spherical magnesium oxide prepared from waste brine via dextran-induced synthesis: characterization, DFT calculations, and formation mechanism // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. V. 13. No 6. P. 120457. doi: 10.1016/j.jece.2025.120457

References

1 Shi J., Nie J., Yan W. et al. Microstructures and properties of microporous magnesia aggregates from $Mg(OH)_2$ and magnesite. Journal of Asian Ceramic Societies. 2025. vol. 13. no. 3. pp. 213–222. doi: 10.1080/21870764.2025.2530829

2 Podobiński J., Datka J. Basic properties of ZnO, Ga_2O_3, and MgO – quantitative IR studies. Catalysts. 2024. vol. 14. article 106. doi: 10.3390/catal14020106

3 Singh R.J., Kalose S.A., Das S.K. et al. Mesostructured MgO micro-rods as recyclable heterogeneous catalysts for the iodine-mediated synthesis of imidazo[1,2 – a] pyridines. Chemistry Select. 2025. vol. 10. article e04573. doi: 10.1002/slct.202504573

4 Ghane Gardeh M., Kistanov A.A., Nguyen H. et al. Exploring mechanisms of hydration and carbonation of MgO and $Mg(OH)_2$ in reactive magnesium oxide-based cements. Journal of Physical Chemistry C. 2022. vol. 126. pp. 6196–6206. doi: 10.1021/acs.jpcc.1c10590

5 Halawy S.A., Osman A.I., Nasr M. et al. Mg–O–F nanocomposite catalysts defend against global warming via the efficient, dynamic, and rapid capture of CO_2 at different temperatures under ambient pressure. ACS Omega. 2022. vol. 7. pp. 38856–38868. doi: 10.1021/acsomega.2c04587

6 Wu S., Lee W.P.C., Thenuwara H.N. et al. Enhancing CO_2 adsorption on MgO: insights into dopant selection and mechanistic pathways. Biomimetics. 2025. vol. 10. article 9. doi: 10.3390/biomimetics10010009

7 Du J. – H., Chen L., Zhang B. et al. Identification of CO_2 adsorption sites on MgO nanosheets by solid-state nuclear magnetic resonance spectroscopy. Nature Communications. 2022. vol. 13. article 707. doi: 10.1038/s41467–022–28405–6

8 Semenova E.A., Lanovetskiy S.V. Modern technologies for extracting magnesium from hydromineral sources (review). South-Siberian Scientific Bulletin. 2025. no. 6 (64). pp. 285–296. doi: 10.25699/SSSB.2025.64.6.045 (in Russian)

9 Todan L., Predoană L., Petcu G. et al. Comparative study of MgO nanopowders prepared by different chemical methods. Gels. 2023. vol. 9. article 624. doi: 10.3390/gels9080624

10 Rashid S., Islam S., Qamer S. et al. A review of green synthesized magnesium oxide nanoparticles coated textiles. Journal of Industrial Textiles. 2026. vol. 55. doi: 10.1177/15280837251313518

11 Vosmerikov A.A., Vosmerikova L.N., Vosmerikov A.V. Acidic and catalytic properties of Mg – containing zeolite catalyst in the propane conversion to olefinic hydrocarbons. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2023. V. 66. No 11. P. 42–49. doi: 10.6060/ivkkt.20236611.2t (in Russian)

12 Sadgar A.L., Deore T.S., Jayaram R.V. Pickering interfacial catalysis – Knoevenagel condensation in magnesium oxide-stabilized Pickering emulsion. ACS Omega. 2020. vol. 5. pp. 12224–12235. doi: 10.1021/acsomega.0c00819

13 Gliński M., Czajka A., Ulkowska U. et al. A hands-on guide to the synthesis of high-purity and high-surface-area magnesium oxide. Catalysts. 2022. vol. 12. article 1595. doi: 10.3390/catal12121595

14 Thomele D., Baumann S.O., Schneider J. et al. Cubes to cubes: organization of MgO particles into one-dimensional and two-dimensional nanostructures. Crystal Growth and Design. 2021. vol. 21. pp. 4674–4682. doi: 10.1021/acs.cgd.1c00535

15 Lim Y. – T., So S. – Y., Jang H. – S. Effect of calcination temperature on the light burned MgO matrix and its physical properties. Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2022. vol. 21. no. 2. pp. 500–510. doi: 10.1080/13467581.2020.1869021

16 Bassioni G., Farid R., Mohamed M. et al. Effect of different parameters on caustic magnesia hydration and magnesium hydroxide rheology: a review. Materials Advances. 2021. vol. 2. pp. 6519–6531. doi: 10.1039/d0ma00887g

17 Septianingsih L., Dongdong Y., Lina L. et al. Integrated recovery of magnesium from magnesium-rich hydrometallurgical wastewater via precipitation and calcination. Minerals Engineering. 2026. vol. 248. article 110566. doi: 10.1016/j.mineng.2026.110566

18 Ahmed M. Experimental and process simulation study on the production of magnesium hydroxide and magnesium oxide from seawater reverse osmosis brine. Journal of Chemical and Petroleum Engineering. 2026. (in press). doi: 10.22059/jchpe.2026.408620.1695

19 Wang M.J., Li M., Bai L.M. et al. Research on the influence of thermal decomposition of magnesium chloride hexahydrate on the preparation of magnesium oxide and hydrated magnesium hydroxide. Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2024. vol. 60. no. 5. article 193614. doi: 10.37190/ppmp/193614

20 Hou Q., Li J., Luo X. et al. Development and characterization on the isothermal kinetics of $Mg(OH)_2$-sol synthesized by chemical method. Journal of Asian Ceramic Societies. 2022. vol. 10. no. 1. pp. 130–137. doi: 10.1080/21870764.2021.2019376

21 Rizal M.N., Nurhayati E., Tangahu B.V. et al. Nano-MgO synthesis and characterization using $MgCl_2$ via precipitation method. Dampak. 2025. vol. 22. no. 2. pp. 31–41. doi: 10.25077/dampak.22.2.31–41.2025

22 Rajabimashhadi Z., Naghizadeh R., Zolriasatein A. et al. Novel synthesis of nano $Mg(OH)_2$ by means of hydrothermal method with different surfactants. Nanomaterials. 2023. vol. 13. article 454. doi: 10.3390/nano13030454

23 Song Y., Qu T., Zhang J. et al. Enhancing cyclic stability and anti-sintering capacity of $CaCO_3$-MgO sorbents for CO_2 capture. Chemical Engineering Science. 2025. vol. 309. article 121433. doi: 10.1016/j.ces.2025.121433

24 Singh I., Hay R., Celik K. Recovery and direct carbonation of brucite from desalination reject brine for use as a construction material. Cement and Concrete Research. 2022. vol. 152. article 106673. doi: 10.1016/j.cemconres.2021.106673

25 Luu T. – A., Nguyen A. – Q., Le V. – G. Magnesium recovery from real high strength industrial wastewater via fluidized bed homogeneous granulation process. Journal of Water Process Engineering. 2026. vol. 88. article 110205. doi: 10.1016/j.jwpe.2026.110205

26 Lu T. – K., Lin T. – Y., Huang C. – P. et al. Optimized fluidized bed homogeneous crystallization process for recovering magnesium as granulated magnesium hydroxide from high-salinity water. Separation and Purification Technology. 2025. vol. 377. part 3. article 134407. doi: 10.1016/j.seppur.2025.134407

27 Liu S., Li Y., Guo H. et al. Preparation of nano-hexagonal flake magnesium hydroxide from seawater brine and the crystallization-based separation of inorganic salt products from the mother liquor. Desalination. 2025. vol. 612. article 118954. doi: 10.1016/j.desal.2025.118954

28 Usman J., Shafi Q.I., Salhi B. et al. Experimental and chemometric insights into sustainable magnesium hydroxide recovery from RO reject brine. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2026. vol. 14. no. 2. article 120997. doi: 10.1016/j.jece.2025.120997

29 Senevirathna H.L., Lee W.P.C., Wu S. et al. Transforming desalination brine into highly reactive magnesium oxide and life cycle analysis. Watershed Ecology and the Environment. 2025. vol. 7. pp. 36–46. doi: 10.1016/j.wsee.2025.01.001

30 Wang Y., Jiang B., Yu H. et al. Porous spherical magnesium oxide prepared from waste brine via dextran-induced synthesis: characterization, DFT calculations, and formation mechanism. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. vol. 13. no. 6. article 120457. doi: 10.1016/j.jece.2025.120457

Сведения об авторах

Елизавета А. Семенова магистр, кафедра химической технологии и экологии, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр., 29, г. Пермь, 614990, Россия, semenovaliza2512@gmail.com
https://orcid.org/0009-0007-3369-5434

Сергей В. Лановецкий д.т.н., профессор, кафедра химической технологии и экологии, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр., 29, г. Пермь, 614990, Россия, lsv98@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2490-1706

Даниил О. Руденко ассистент, кафедра химической технологии и экологии, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр., 29, г. Пермь, 614990, Россия, rudenko.d.o@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0006-2807-3705

Information about authors

Elizaveta A. Semenova Master student, Department of Chemical Technology and Ecology, Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky Av., 29, Perm, 614990, Russia, semenovaliza2512@gmail.com
https://orcid.org/0009-0007-3369-5434

Sergey V. Lanovetskiy Dr. Sci. (Tech.), professor, Department of Chemical Technology and Ecology, Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky Av., 29, Perm, 614990, Russia, lsv98@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2490-1706

Daniil O. Rudenko Assistant Lecturer, Department of Chemical Technology and Ecology), Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky Av., 29, Perm, 614990, Russia, rudenko.d.o@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0006-2807-3705

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 29/06/2026	**После редакции** 27/07/2026	**Принята в печать** 20/08/2026
Received 29/06/2026	**Accepted in revised** 27/07/2026	**Accepted** 20/08/2026