2022

УДК 66.088

ПОЛУЧЕНИЕ ГИДРОКСИДА АЛЮМИНИЯ ПРИ КИСЛОТНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ КАОЛИНОВОГО КОНЦЕНТРАТА В УСЛОВИЯХ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ

Т. Ю. Еранская

Институт геологии и природопользования ДВО РАН, E-mail: taerta@mail.ru, пер. Релочный, 1, 675000, г. Благовещенск, Россия

Разработан новый метод кислотного выщелачивания каолинового концентрата — выщелачивание в условиях ультразвуковой кавитации, используемой как катализирующий фактор. Метод позволяет перерабатывать глиноземсодержащий концентрат без затрат на нагрев пульпы и вакуумирование оборудования. В лабораторных условиях получен выход гидроксида алюминия более 90% от теоретически возможных показателей. Создана замкнутая по всем расходным материалам принципиальная схема технологического процесса.

Кавитация ультразвуковая, выщелачивание, концентрат каолиновый, каолинит, гидроксид алюминия, глинозем, кислота азотная

DOI: 10.15372/FTPRPI20220311

Многие годы алюминиевая промышленность испытывает недостаток в высококачественных бокситах — традиционном сырье для производства глинозема — из-за ограниченности их запасов. Существуют технологии для получения глинозема из низкокачественных бокситов или другого глиноземсодержащего сырья (алунитов, нефелинов, сланцев, каолинов), но они затратны и экологически небезопасны. Месторождения этих минералов широко распространены и относительно доступны.

Большинство технологий для переработки подобного сырья основаны на принципах щелочного выщелачивания бокситов по методу Байера [1]. Более прогрессивные, с меньшим количеством технологических переходов, но также не лишенные вредных выбросов, кислотные технологии требуют специального кислотостойкого оборудования [2–5]. В данной работе для лабораторных условий разработана альтернативная кавитационная кислотная технология выщелачивания каолинового концентрата. Использованы теоретические основы выщелачивания каолинита кислотами для реакторной технологии [6]. Герметичный термореактор заменен на ультразвуковой кавитационный аппарат открытого типа.

Как правило, ультразвуковые технологии при работе с минеральным сырьем применяют для очистки поверхности частиц от окисных пленок и различных загрязнений, а также для дробления породы и ее дезинтеграции вплоть до пылеобразного состояния, редко — в качестве интенсификатора технологических процессов [7–11]. Примеры использования кавитации при переработке каолинов описаны в [12, 13], где кавитация применяется с разными целями, но не для получения глинозема или гидроксида алюминия.

Nº 3

Метод ультразвукового кавитационного разложения или выщелачивания каолинов для получения глинозема разрабатывается впервые. Цель настоящей работы — исследование процесса выщелачивания (вскрытия) высококремнеземистого каолинового концентрата в растворе азотной кислоты в условиях ультразвуковой кавитации и разработка схемы технологического процесса получения гидроксида алюминия. Предварительные итоги исследования опубликованы в [14–17].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследований — каолиновый концентрат Чалганского месторождения (п. Чалганы, Амурская область), прошедший первичное обогащение мокрым способом. В состав концентрата входят следующие оксиды, %: SiO₂ — 50.44; Al₂O₃ — 32.83; Fe₂O₃ — 1.46; K₂O — 1.45; TiO₂, MnO, CaO, MgO, Na₂O, P₂O₅ от 0.01 до 0.41 и кристаллизационная вода — 12.42. Чалганский каолин высококремнеземистый и отличается от каолинов из других месторождений низким содержанием оксида железа.

Концентрат представляет собой смесь из минерала каолинита, оксида кремния, ортоклаза и некоторого количества примесных соединений. Основной алюминийсодержащий компонент — каолинит. Его химический состав, %: Al₂O₃ — 39.5, SiO₂ — 46.5, H₂O — 14.0; химическая формула Al₄[Si₄O₁₀](OH)₈ или Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O.

Известно, что каолинит имеет двухслойную кристаллическую структуру без зарядов на базальных поверхностях. Этим объясняется практически полное отсутствие изоморфных замещений. Атомы кислорода и ионы ОН⁻ в смежных пакетах прочно связаны водородной связью типа О–Н, препятствующей внутрикристаллическому разбуханию решетки. Каолин имеет низкую способность к химическому взаимодействию, и обмен катионами в основном происходит на внешних, механически разорванных связях [18, 19].

Для разрыва связи внутри пакета необходимо создавать специальные условия. Один из наиболее простых способов — удаление химически связанной воды из молекулы каолинита путем выдержки концентрата в интервале температур 650-800 °C [6]:

$$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O \rightarrow Al_2O_{3(amop\phi)} + 2SiO_{2(amop\phi)} + 2H_2O_{1ap}.$$
 (1)

При этих температурах каолинит превращается в метакаолинит с аморфной структурой, где аморфные оксиды алюминия и кремния находятся в практически несвязанном между собой состоянии. Химическую реакцию (1) можно записать в виде уравнения

$$2Al_2Si_2O_5(OH)_4 \rightarrow 2Al_2Si_2O_7 + 4H_2O.$$

Обожженные каолиниты разлагаются более полно и имеют высокую реакционную способность. Оптимальный интервал температур для обжига каолинов 700 – 750 °C [6].

Так как чалганский каолин высококремнеземистый, его переработка щелочными способами нецелесообразна. Оба компонента каолиновой породы вступают во взаимодействие с щелочью, а последующее их разделение усложняет и удорожает технологический процесс. Наиболее рентабельна и перспективна кислотная технология. Кислоты, кроме ограниченного ряда, не взаимодействуют с оксидом кремния, позволяя уже в самом начале технологического процесса отделить кремнезем от глинозема. Таким образом значительно сокращается или исключается применение дополнительных реагентов по ходу технологического процесса [20]. Чаще используется серная, сернистая, соляная и азотная кислоты. К недостаткам кислотных технологий относят сложность регенерации кислоты после выщелачивания, необходимость очистки технологического раствора от железа и других примесей и использование специальной кислотостойкой аппаратуры. Выбор кислоты зависит от конкретных условий. Наиболее применяемыми являются сернокислые способы. Однако в последние годы азотнокислотное выщелачивание глиноземсодержащих пород получает большее распространение из-за более простых методов регенерации кислоты, проводимой методом термического гидролиза и относительной легкости разложения нитратных солей по сравнению с сульфатными и хлоридными [6, 21].

Реакция метакаолинита с азотной кислотой имеет вид

$$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + 6HNO_3 = 2Al(NO_3)_3 + 2SiO_2 \downarrow + 3H_2O.$$
 (2)

Одновременно с алюминатной составляющей породы в реакцию с кислотой вступает оксид железа:

$$Fe_2O_3 + 6HNO_3 = 2Fe(NO_3)_3 + 3H_2O_2$$
.

Очистка технологического раствора от азотнокислого железа проводится традиционными способами. Каолины Чалганского месторождения содержат незначительное количество железа и относятся к маложелезистым, что сокращает затраты и потери алюминия при очистке технологического раствора от соединений железа. При разложении по (2) алюминатная составляющая метакаолинита переходит в раствор в виде азотнокислого алюминия, а силикатная составляющая и свободный оксид кремния выпадают в осадок.

Реакция (2) эндотермическая, т. е. взаимодействие начинается сразу при соединении компонентов. При температуре 18-20 °C процесс идет медленно и не до конца, с ее повышением скорость реакции увеличивается. В автоклавных установках создают температуру до 230-250 °C, а для полного и относительно быстрого завершения реакции достаточно 90-95 °C. Согласно [6], при этой температуре и концентрации кислоты 30-45 % разлагается 92-93 % исходной массы метакаолинита.

В отличие от реакторной технологии, где требуемые температуру и давление необходимо обеспечивать специально, в кавитируемой жидкой среде условия для прохождения выщелачивания создаются без использования нагревательного оборудования, герметизации реактора и других дополнительных затрат (только за счет самого эффекта кавитации в жидкости).

Согласно теории, в зоне схлопывания кавитационного пузырька возникает сверхвысокое критическое для данной жидкости давление и температура ~2000 °C [22]. Если схлопывание происходит вблизи или на самой поверхности частички, наблюдается ее разрушение, разрыв ионных связей, а значит, создаются условия для активного прохождения химической реакции. Стремительные перемещения микроструек жидкости и газов от схлопывания кавитационных пузырьков приводят к интенсивному перемешиванию пульпы, что способствует ускорению процесса взаимодействия. При этом температура пульпы не превышает 98 °C.

Таким образом, кавитация для данного процесса — катализирующий фактор. За счет подобной интенсификации сокращается время обработки пульпы при каждой загрузке устройства. Вместо нескольких часов или суток в автоклавной технологии, процесс кавитационной обработки минерала длится от нескольких минут до нескольких часов в зависимости от мощности установки. Вследствие относительно невысоких температур реакционной смеси при кавитации не требуется очень дорогих сплавов для технологического оборудования.

Гидроксид алюминия осаждается при химическом взаимодействии азотнокислого алюминия с раствором аммиака:

$$Al(NO_3)_3 + 3NH_3 + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 \downarrow + 3NH_4NO_3$$

108

Данная химическая реакция и процедура получения гидроксида алюминия является традиционной и обязательной в любой из азотнокислотных технологий переработки каолина. В осадок выпадает гелеобразное вещество в виде шариков или хлопьев. Его состав соответствует гидраргиллиту, после удаления влаги он приобретает кристаллическую структуру, соответствующую гидроксиду алюминия [6].

Образование глинозема из каолинового концентрата состоит из четырех основных стадий: обжиг, выщелачивание аморфного концентрата в азотной кислоте, осаждение алюминатного раствора аммиачной водой и производство конечного продукта. В настоящем исследовании последняя стадия не выполнялась, так как она не связана с тематикой экспериментов и может быть проделана одним из известных способов. Стадия осаждения раствора аммиачной водой также не связана с новой технологией переработки каолинов, но необходима для оценки ее эффективности. Такая оценка проводилась путем взвешивания высушенного гидроксида алюминия, данный результат сравнивался с расчетным значением. По этой причине завершающим этапом экспериментов явилось осаждение алюминатного раствора аммиачной водой до гидроксида алюминия (ГА). На рис. 1 приведена схема технологического процесса получения гидроксида алюминия.



Рис. 1. Принципиальная схема технологического процесса получения гидроксида алюминия с ультразвуковым выщелачиванием

Технологический процесс замкнут по расходным материалам: вода, кислота, аммиачная вода. В схеме учтены их регенерация и возврат к началу процесса. Рекомендованы направления использования побочных продуктов и отходов производства. Выщелачивание каолинового концентрата осуществлялось на специальной лабораторной установке, основу которой составляет ультразвуковой технологический аппарат "Феникс" (модель УЗТА-1/22-ОРв, производитель ООО "Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ", г. Бийск). Потребляемая мощность аппарата 1000 ВА, диапазон механических колебаний 20±2 кГц, принцип преобразования электрических колебаний в механические — пьезоэффект, амплитуда колебаний торцевой поверхности рабочего инструмента составляет 25–30 мкм.

Установка помещена в защитный кожух из прозрачного материала и снабжена прямоточной вытяжкой. Ультразвуковой аппарат закреплен на раме. Емкость с образцом после установки на заданную высоту вращается со скоростью 70 об./мин. Передняя стенка кожуха съемная. Время работы и мощность воздействия задаются генератором ультразвуковых колебаний. Подготовка образца заключалась в обжиге концентрата в стандартной муфельной печи с пределом нагрева 1200 °C за 1-3 ч. Температура обжига 650-800 °C. Использовались навески обожженного каолина 10, 20, 30, 40 г. Концентрация раствора азотной кислоты в дистиллированной воде составляла 5-40%, объем раствора — 300, 600, 800 и 1000 мл.

Ультразвуковое кислотное выщелачивание выполнялось в следующем порядке. Емкость с заданной концентрацией раствора азотной кислоты и порцией каолина устанавливалась на определенную высоту относительно рабочего инструмента аппарата, включалось ее вращение и ультразвуковое воздействие. По истечении заданного времени генератор автоматически отключал аппарат. Емкость с образцом поступала на охлаждение и отстаивание осадка. Непрореагировавший осадок отфильтровывался и промывался дистиллированной водой. Азотнокислый алюминий в избытке кислоты совместно с промывной водой упаривался с помощью песчаной бани на 60-70% от первоначального объема. Следующая стадия процесса (получение гидроксида алюминия) выполнялась при температуре упаренного раствора 65-80 °C. Получаемые гелеобразные сгустки в виде хлопьев или шариков белого цвета являются гидратированной формой гидроксида алюминия, который затем отфильтровывался, промывался дистиллированной водой и высушивался.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты, полученные при реализации заявленных экспериментов, близки к данным, представленным в [6]. Выход гидроксида алюминия из чалганского каолинового концентрата в экспериментах с использованием кавитационного метода кислотного выщелачивания соответствует показателям, получаемым при традиционных способах. Выщелачивание проводится без дополнительного нагрева пульпы и герметизации реакторного оборудования, только за счет самого эффекта кавитации, а подготовительные и заключительные операции — обычным образом.

На первой стадии процесса при подготовке каолина путем обжига потери массы образцов составляли 11.87–12.56%, независимо от конечной температуры нагрева. Это происходит вследствие удаления кристаллизационной воды из молекулы каолинита за счет испарения естественной влаги и выгорания биологической составляющей концентрата. Дегидратация заканчивается при 650 °C, а последующий нагрев до 800 °C ведет к перестройке структуры [6]. Дифрактограммы концентрата, обожженного в этом диапазоне температур, абсолютно идентичны. Пики на диаграммах принадлежат свободному оксиду кремния, входящему в исходный каолиновый концентрат. Дифрактограмма непрореагировавшего осадка совпадает с диаграммой концентрата, свидетельствуя о его неполном разложении.

В табл. 1 приведен состав образцов после обжига при трех температурах в сравнении с исходным каолином. Процентное отношение оксидов алюминия, кремния и других компонентов после обжига к исходному содержанию в каолине не изменилось.

Состав каолина	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Loi()	Сумма
Исходный	50.44	32.83	0.41	1.46	0.01	0.36	0.24	0.20	1.45	0.02	12.42	99.84
После обжига при 600 °C	56.42	37.20	0.46	1.65	0.01	0.41	0.20	0.18	1.63	0.02	1.60	99.78
700 °C	55.75	38.46	0.48	1.69	0.01	0.42	0.26	0.19	1.66	0.03	0.79	99.74
800 °C	57.15	37.35	0.46	1.66	0.01	0.41	0.20	0.19	1.62	0.02	0.70	99.77

ТАБЛИЦА 1. Состав исходного и обожженного каолина, %

На рис. 2 показана зависимость температуры пульпы от времени ультразвуковой обработки. До 80-85 °C температура растет практически по прямой, максимальная составила 98.5 °C. Так как реакция взаимодействия азотной кислоты с каолинитом по (2) экзотермическая, то нагревание смеси начинается сразу же при смешивании компонентов. На момент включения ультразвука она составляла 27 °C.



Рис. 2. Изменение температуры пульпы в процессе кавитации

Зависимость выхода готового продукта от кислотности раствора приведена на рис. 3. Количество получаемого гидроксида алюминия в процентах от стехиометрической нормы растет с увеличением содержания кислоты в растворе. Эксперименты проводились с растворами, концентрация которых не превышала 40%. Дальнейшее увеличение концентрации кислоты нецелесообразно вследствие ее большого перерасхода и незначительного прироста продукта.



Рис. 3. Зависимость выхода продукта от концентрации рабочего раствора (в процентах от стехиометрии)

В процессе экспериментов определялись ограничения для данного ультразвукового оборудования. Низкая мощность аппарата не позволяет использовать навески образцов, равные 40 г и выше. Мощности ультразвуковых колебаний инструмента и перемешивания пульпы вращением недостаточно для удерживания всей массы образца во взвешенном состоянии. Ультразвуковые волны гасятся в плотной массе пульпы, сокращая область действия ультразвука. В таких опытах значительная часть метакаолинита не участвует в реакции выщелачивания, плотной массой оседая на дне стакана. Все эксперименты осуществлялись при максимальной мощности, несмотря на то что генератор ультразвуковых колебаний позволяет снижать мощность со 100 до 30%.

При навесках менее 20 г получены слишком низкие результаты относительно расчетных данных, что связано с большим процентом потерь на фильтрах и посуде при выполнении последующих операций. Температуру 95–96 °C реакционная масса набирает уже в первые минуты работы, поэтому в процессе обработки происходит интенсивное испарение жидкой составляющей. В опытах с растворами объемом менее 800 мл испарение приводит к критическому снижению уровня жидкости над рабочим инструментом и, как следствие, к риску выхода оборудования из строя. На рис. 4 показан подъем температуры в пульпе. Замеры выполнялись термопарой "хромель–копель", которая начала разрушаться через 16 мин под действием известных свойств кавитации.



Рис. 4. Изменение выхода готового продукта от температуры пульпы в процессе кавитации

Проблематичным является определение периода времени для ультразвуковой обработки пульпы. При одинаковых исходных параметрах за одно и то же время обработки был получен большой разброс результатов, составляющий до 40% между минимальным и максимальным значениями. Причина — неустойчивость работы генератора колебаний, так как используемый аппарат не предназначен для такого рода экспериментов.

На рис. 5 приведен пример зависимости выхода гидроксида алюминия от времени обработки для одной из наиболее устойчивых серий (масса образца метакаолинита 20 г, обжиг при 700 °C, концентрация раствора 40 %, время обработки 10-90 мин). Максимальный выход готового продукта получен при работе аппарата в течение 70 мин. Последующее снижение результата связано со значительным сокращением числа активных ионов метакаолинита, а также с испарением жидкой фазы, содержащей раствор азотнокислого алюминия.



Рис. 5. Зависимость выхода гидроксида алюминия от времени кавитации (в процентах от стехиометрии)

Скорость фильтрации азотнокислого раствора после кавитации зависит от его плотности и степени декомпозиции твердой фазы. Чем выше концентрация азотной кислоты, тем больше плотность полученного раствора и тем медленнее проходит фильтрация. Чем выше степень измельчения концентрата под действием кавитации, тем сильнее забиваются поры фильтров. При фильтровании и промывке гелеобразного гидраргиллита во второй части процесса поры фильтров перекрываются коагулирующимися частичками, приводя к значительным потерям продукта на фильтрах.

Операции фильтрования — самые затратные по времени. Введение принудительного фильтрования посредством перистальтических насосов [17] значительно сократило время на данную операцию, но часто приводило к загрязнению отфильтрованного раствора супермелкими частичками осадка в первой части процесса и потерям гидраргиллита во второй за счет массового прохода его первичных микрохлопьев через фильтр с промывной водой. Оба эти явления наблюдались и при фильтровании обычным образом.

В результате экспериментов получен гидроксид алюминия двух видов кристаллических структур — Al(OH)₃ и AlOOH (карточки 00-012-0457, 00-017-0940 [23, 24]). Их рентгенофазовый анализ выполнен на рентгеновском дифрактометре Maxima XRD-700 (Си_{Ка} излучении $\lambda = 1.54060$ Å), рентгенофлуоресцентный (табл. 2) — на спектрометре Lab Center XRF-1800 (Shimadzu, Япония). Аналитические исследования выполнены в ЦКП "Амурский центр минералого-геохимических исследований" (Институт геологии и природопользования ДВО РАН).

Образец	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P_2O_5	п.п.п.	Сумма
1	1.62	0.05	58.77	1.42	0.02	0.05	0.18	0.06	0.03	0.04	38.33	100.57
2	1.68	0.05	59.34	1.43	0.02	0.04	0.17	< 0.01	0.04	0.05	37.97	100.79

ТАБЛИЦА 2. Содержание оксидов в готовом продукте, %

выводы

Разработан метод кислотного выщелачивания каолинового концентрата с использованием ультразвукового катализирующего эффекта для получения гидроксида алюминия — полуфабриката в производстве глинозема. Он не требует значительных материальных затрат: при реализации технологического процесса проводится прямое получение гидроксида алюминия, исключаются промежуточные операции, что удешевляет стоимость продукта.

Определены оптимальные параметры процесса для применяемого оборудования и необходимые пути совершенствования технологии. Предложена принципиальная схема технологического процесса получения гидроксида алюминия. Главный недостаток технологии — большой объем раствора кислоты по отношению к массе обрабатываемой порции метакаолинита. Перерасход кислоты нивелируется при использовании оборудования бо́льшей мощности. Второй недостаток — сильное испарение жидкой фазы. При температурах, близких к 100 °C, вместе с кислотным раствором испаряется образовывающийся раствор азотнокислого алюминия. Данные потери практически исключаются при использовании другого типа оборудования, например ультразвуковой ванны с технологическим зонтом.

При определении оптимального периода обработки установлено соотношение между временем, конечным объемом раствора, концентрацией кислоты и массой образца. Оптимальные параметры для данного оборудования: время обработки 60 мин, навески метакаолинита 20 и 30 г, концентрация кислоты 40 мас. %, обжиг каолинового концентрата при 700–750 °C, время ультразвуковой обработки не должно превышать 60 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Дубовиков О. А., Яскеляйнен Э. Э. Переработка низкокачественного бокситового сырья способом термохимия-Байер // Зап. ГИ. 2016. Т. 221. С. 668–674.
- **2. Шварцман Б. Х.** Кислотные методы переработки глиноземсодержащего сырья. М.: Цветметинформация, 1964. — 82 с.
- **3.** Сажин В. С. Новые гидрохимические способы получения глинозема. Киев: Наук. думка, 1973. 208 с.
- **4.** Пустильник Г. Л., Певзнер И. З. Кислотные способы переработки низкокачественного алюминийсодержащего сырья. — М.: Цветметинформация, 1978. — 52 с.
- **5.** Сутырин Ю. Е. О развитии кислотных способов получения глинозема: химические методы переработки рудного сырья. М.: ВИМС, 1980. 116 с.
- **6.** Лайнер Ю. А. Комплексная переработка алюминийсодержащего сырья кислотными способами. М.: Наука, 1982. 208 с.
- 7. Ростовцев Н. М. Исследование процесса ультразвукового диспергирования твердых тел: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Орел: ОГПИ, 1961. 11 с.
- 8. Кац М. Я. Кавитационная прочность некоторых минералов // Акуст. журн. 1961. Т. 7. Вып. 1. С. 47–52.
- **9.** Ревнивцев В. И., Дмитриев Ю. Г. Применение ультразвука для очистки вредных примесей искусственных абразивных материалов // Применение ультразвука в машиностроении. — 1963. — С. 36–42.
- **10.** Глембоцкий В. А. Ультразвук в обогащении полезных ископаемых. Алма-Ата: Наука, 1972. 229 с.
- **11. Новицкий Б. Г.** Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М.: Химия, 1983. 192 с.
- **12.** Вайтнер В. В. Исследование азотнокислотной переработки алюмосиликатов для получения оксида алюминия: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: УрГТУ, 2004. 145 с.
- **13.** А. с. SU 1590135. Способ диспергирования каолина / Н. Е. Немчина, Ф. Д. Овчаренко, В. А. Прокопенко // Опубл. в БИ. — 1990. — № 33.
- 14. Еранская Т. Ю., Римкевич В. С. Кавитационный метод обогащения глиноземсодержащего сырья // Хим. технология. — 2012. — Т. 13. — № 5. — С. 291–296.

- **15.** Еранская Т. Ю. Получение гидроксида алюминия кавитационным методом // Хим. технология. 2021. Т. 22. № 4. С. 146–153.
- **16.** Еранская Т. Ю. Кавитационное разложение каолина в кислотном растворе // Междунар. науч.исследоват. журн. — 2019. — № 4. — Ч. 1. — С. 60-64.
- Еранская Т. Ю. Способ ускорения процесса разделения продуктов переработки фильтрацией в лабораторных исследованиях // Вестн. АмГУ. Серия "Естественные и экономические науки". — 2021. — Вып. 83. — С. 101–102.
- **18. Каталог минералов.** Каолинит. Режим доступа: http://www.catalogmineralov.ru/mineral/781.html.
- 19. Брек Д. Цеолитовые молекулярные сита. М.: Мир, 1976. 782 с.
- **20.** Логинова И. В., Шопперт А. А., Рогожников Д. А., Кырчиков А. В. Производство глинозема и экономические расчеты в цветной металлургии. Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2016. 253 с.
- 21. Валеев Д. В. Физико-химические основы получения глинозема и смешанных коагулянтов из бемиткаолиновых бокситов солянокислотным автоклавным выщелачиванием: дис. ... канд. техн. наук. — М.: Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова, 2016. — 143 с.
- **22.** Солодкий Н. Ф., Шамриков А. С., Погребенков В. М. Минерально-сырьевая база Урала для керамической, огнеупорной и стекольной промышленности. Томск: ТПУ, 2009. 332 с.
- **23. Кристаллографическая** и кристаллохимическая база данных для минералов и их структурных аналогов. Режим доступа: http://database.iem.ac.ru/mincryst/rus/index.php.
- 24. Международная база данных PDF2 2008.

Поступила в редакцию 19/IV 2022 После доработки 28/IV 2022 Принята к публикации 06/V 2022