



УДЛ 669.712.1

О РОЛИ ГИДРОКАРБОАЛЮМИНАТОВ КАЛЬЦИЯ В УСОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФЕЛИНОВ

В.М.СИЗЯКОВ, В.Н.БРИЧКИН

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Научное обоснование и разработка способа промышленного синтеза сложных алюминатов щелочно-земельных металлов представляет собой инновационное решение, определившее целый ряд направлений в развитии технологии комплексной переработки нефелинового сырья. Это обеспечивает получение высококачественного металлургического глинозема, эффективную утилизацию нефелинового шлама и выпуск новых видов попутной продукции широкого назначения. Современное развитие этих технических решений связано с обеспечением энергоэффективности синтеза гидрокарбоалюминатов кальция (ГКАК) и увеличением глубины очистки алюминатных растворов. Экспериментально определены условия синтеза ГКАК с использованием известковых материалов природного и техногенного происхождения, что позволяет выделить средний диаметр частиц в качестве одного из определяющих факторов этого процесса. Теоретически обосновано влияние оборота гидрогранатового шлама на снятие кинетических ограничений в процессе глубокого обескремнивания алюминатных растворов. Экспериментально определены условия двухстадийной дозировки ГКАК. Показано, что оптимальное соотношение количества реагента, подаваемого на первой и второй стадии, составляет около 3:2. При этом максимальная степень осаждения кремнезема обеспечивает получение алюминатных растворов с кремниевым модулем на уровне 95000, что достигается при использовании ГКАК, синтезированного на основе химически осажденного карбоната кальция при переработке отходов производства минеральных удобрений.

Ключевые слова: синтез реагентов, сложные алюминаты, энергоэффективность, направления использования, портландцемент, глубокое обескремнивание, режимы и показатели, карбонат кальция, экспериментальное исследование

Как цитировать эту статью: Сизяков В.М. О роли гидрокарбоалюминатов кальция в усовершенствовании технологии комплексной переработки нефелинов / В.М.Сизяков, В.Н.Бричкин // Записки Горного института. 2018. Т. 231. С. 292-298. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.292

Введение. Современный металлургический комплекс России производит около 1,35 млн т глинозема из нефелинового сырья и значительное количество попутной продукции, включая гидроксид алюминия неметаллургических сортов, портландцемент и строительные материалы на его основе, силикатный кирпич, содопоташные продукты, минеральные удобрения, металлический галлий и ряд других материалов. Основные характеристики этого производства, включая удельные материальные потоки, хорошо известны, а его высокие технико-экономические показатели являются стимулом для проектирования и создания новых производственных мощностей. При этом решение дефицита отечественного глинозема для получения первичного алюминия неизменно связывается с развитием производства на основе нефелинового сырья и его близких аналогов [9, 13]. Обязательными условиями эффективной реализации таких планов являются: решение суммы задач по долгосрочному обеспечению производства сырьевыми ресурсами, снижению энергетических затрат, обеспечению экономически обоснованного соотношения основной и попутной продукции, включая продукцию с высокой добавленной стоимостью, и их качества.

К настоящему моменту определены основные тенденции и перспективы развития сырьевой базы производства глинозема из высококремнистого алюминиевого сырья за счет выявленных ресурсов уртитовых и рисчорритовых пород Хибинского горного массива, вовлечения в оборот лежалых хвостов апатитового производства и низкокачественных бокситов, использования природных ресурсов Центральной и Восточной Сибири [1, 3, 16]. Значительные резервы в поддержании сырьевой базы производства алюминия связаны с использованием алюминийсодержащих шлаков ферросплавного и литейного производства, зол ТЭЦ, отходов водоочистки и другого сырья техногенного происхождения [2].

В решении наиболее болезненного для технологии переработки нефелинового сырья вопроса, связанного с высоким потреблением технологического топлива и, следовательно, расходами на него, также наметились некоторые перемены. При этом определены и реализуются экономически обоснованные подходы, включающие технологию сухого приготовления известняково-нефелиновой шихты и использования низкосортного технологического топлива на базе региональных месторождений бурого и каменного угля [15, 17].

Не простой проблемой является обеспечение баланса производства основной и попутной продукции, который связан с утилизацией нефелинового (белитового) шлама в производстве

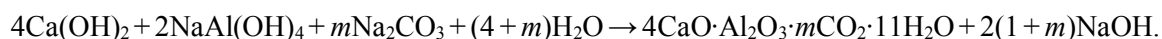


портландцемента. Теоретическая проработка этого вопроса, выполненная в 80-е и 90-е годы XX в., в последнее время приобрела характер системного исследования, позволяющего рассчитывать на его решение [12].

Наконец качество конечной продукции неизменно связывается с возможностью получения гидроксида алюминия и глинозема, не только удовлетворяющего требованиям ГОСТа, но и превосходящего по своим характеристикам существующие требования. Это создает значительный резерв для переработки низкокачественного и высококремнистого сырья, получения алюминия высокой чистоты и инновационной продукции, востребованной в высокотехнологичных производствах. Настоящая революция в данной области связана с развитием теории синтеза метастабильных твердых растворов в системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ и их использованием для глубокой очистки алуминатных растворов от неорганических примесей и производства специальных вяжущих материалов [4,6-10].

Постановка задач исследований и разработок. Гидрокарбоалюминаты кальция $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot m\text{CO}_2\cdot 11\text{H}_2\text{O}$ (ГКАК), являющиеся производными гидроалюминатов типа $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot x\text{H}_2\text{O}(\text{C}_4\text{AH}_x)$, широко известны в области химии цемента. Они устойчивы в водных растворах при температурах ниже 20°C , что обеспечивает их образование в процессе медленного твердения цементного камня [14]. При повышении температуры гексагональные гидроалюминаты и гидрокарбоалюминаты переходят в устойчивое соединение кубической сингонии – трехкальциевый гидроалюминат $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}\cdot(\text{C}_3\text{AH}_6)$.

Впервые возможность синтеза и использования гидрокарбоалюминатов кальция в области специальных технологий появилась в результате работ, установивших, что ГКАК кристаллизуется с высокой скоростью в среде сильных электролитов в условиях глиноземного производства [4, 5]. Процесс образования гидрокарбоалюминатов описывается реакцией взаимодействия извести с алуминатно-щелочным раствором:



Это обеспечивает кристаллизацию гидрокарбоалюминатов кальция в широком диапазоне температур ($20-100^\circ\text{C}$), при концентрации Na_2O_k до 300 г/л и значении каустического модуля раствора $\alpha_k = 1,5-33,0$. В зависимости от температуры время существования ГКАК измеряется от 1 мин до 12-16 ч. При увеличении времени термостатирования ГКАК переходит в термодинамически устойчивое соединение C_3AH_6 .

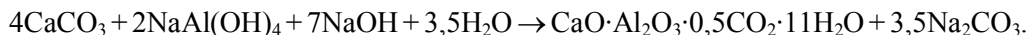
Успешному использованию гидрокарбоалюминатов кальция способствовала разработка эффективного метода их синтеза в алуминатно-щелочной среде [5], отличающегося не только высокой скоростью химических превращений, но и равномерностью химического и дисперсного состава продуктов. В настоящее время гидрокарбоалюминаты кальция типа $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot m\text{CO}_2\cdot 11\text{H}_2\text{O}$ широко применяются в технологии производства глинозема для полного разделения ионов алюминия и кремния, на чем основан известный способ получения глинозема высших марок при комплексной переработке низкокачественного алюминиевого сырья [11].

В результате исследований выявляются все новые и новые свойства гидрокарбоалюминатов кальция, что способствует их широкому продвижению в промышленность. Наиболее перспективными направлениями использования ГКАК в различных отраслях народного хозяйства являются следующие:

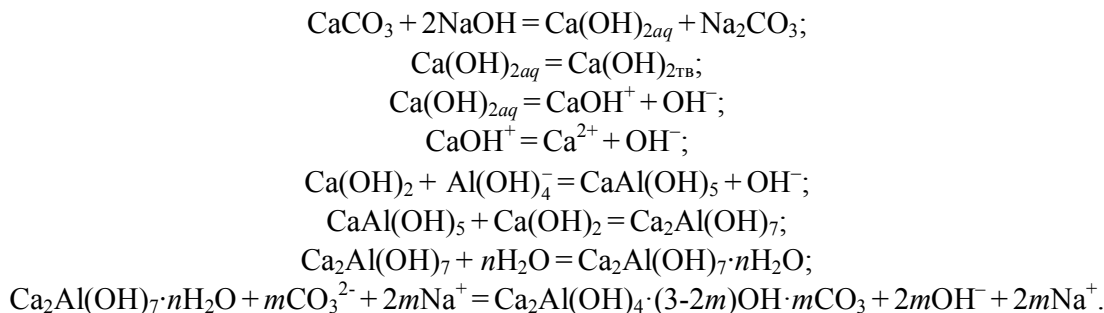
- 1) производство быстротвердеющих, тампонажных и напрягающих цементов;
- 2) производство высокоглиноземистых цементов;
- 3) производство гидроизоляционных смесей и герметиков;
- 4) производство сухих цементных смесей;
- 5) синтез сульфокрбоалюминатных минерализаторов для обжига портландцементных сырьевых смесей;
- 6) направленный синтез сверхактивных ионообменников и коагулянтов для очистки бытовых и промышленных стоков.

Экспериментальные исследования и реализация технологических процессов. В последнее время получили дальнейшее развитие научные основы синтеза и применения сульфокрбоалюминатных соединений, что способствует эффективному продвижению новых технологий в этой области. Альтернативой уже существующему способу синтеза гидрокарбоалюмината

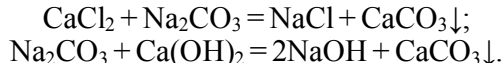
кальция, внедренному на Пикалевском глиноземном заводе – СУАЛ, является возможность получения метастабильных фаз требуемого состава в условиях термодинамической неустойчивости карбонатов щелочно-земельных металлов. В этом случае подход к метастабильной области должен отвечать следующей стехиометрии:



Не вызывает сомнений сложность и многостадийность протекающих при этом процессов. Исходя из имеющихся представлений о синтезе ГКАК на основе гидроксида кальция, можно предполагать, что при относительно невысоких температурах (50-70 °С) карбонат кальция реагирует с алюминатным раствором по схеме:



Синтез ГКАК осуществлялся в лабораторном масштабе с использованием искусственного алюминатного раствора и препаратов карбоната кальция, отличающихся способом получения и физико-химическими свойствами. В задачу исследования входило определение установившихся составов щелочных растворов при синтезе ГКАК и кинетических параметров этого процесса в зависимости от природы и свойств карбонатных материалов. При этом была использована проба измельченного природного известняка Пикалевского месторождения, проба реактивного карбоната кальция марки ЧДА, а также пробы карбоната кальция, синтезированные в лабораторных условиях на основе характерных химических взаимодействий по реакциям:



Особый интерес вызывают результаты лазерного микроанализа, так как позволяют выстроить все пробы в порядке изменения средневзвешенного размера частиц. Он уменьшается в ряду от CaCO_3 марки ЧДА (средний диаметр частиц 89,7 мкм) до CaCO_3 , полученного по реакции каустификации соды (средний диаметр частиц 2,3 мкм). При этом все пробы кроме природного известняка обладают узким фракционным составом.

Показатели лабораторного синтеза ГКАК приведены на рис.1 и 2, что позволяет обосновать выбор состава алюминатного раствора по величине каустического модуля, предпочтительный

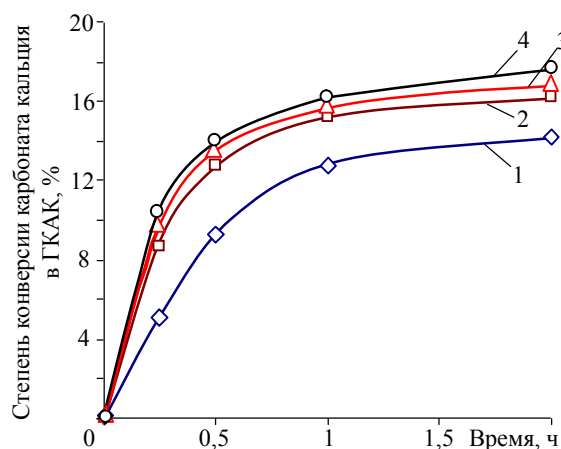


Рис.1. Показатели конверсии известковых компонентов при синтезе ГКАК в низкомолекулярных растворах с $\alpha_k = 1,45$
1 – CaCO_3 марки ЧДА; 2 – природный известняк; 3 – CaCO_3 осажден из раствора CaCl_2 ; 4 – CaCO_3 осажден по реакции каустификации соды

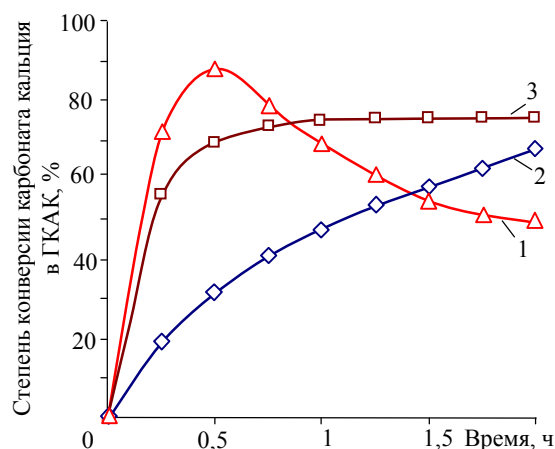
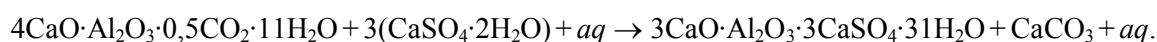


Рис.2. Показатели конверсии известняка Пикалевского месторождения при синтезе ГКАК в высокомолекулярных растворах с $\alpha_k = 3,0 - 3,3$ при различной температуре
1 – 90 °С; 2 – 50 °С; 3 – 70 °С

температурный режим, длительность процесса, а также оценить значение природы и фракционного состава известкового материала. Эти результаты указывают на необходимость использования алюминатных растворов с повышенным содержанием свободной каустической щелочи для смещения равновесия системы в сторону образования гидроксида кальция и его последующей конверсии в ГКАК в соответствии с рассмотренной схемой. Применение известковых материалов высокой дисперсности создает предпосылки для использования известковых шламов и химически осажденного карбоната кальция, образующихся в различных технологических процессах.

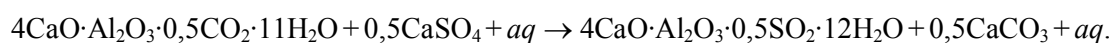
Высокая реакционная активность ГКАК представляет заметный интерес для интенсификации процессов формирования цементного камня и портландцементного клинкера с учетом высокой скорости образования продуктов в указанной системе. В то же время сами процессы, характерные для гидратации цементов в первом случае и высокотемпературного обжига сырьевых смесей в другом, принципиально отличаются. При участии ГКАК процесс гидратации сопровождается образованием термодинамически устойчивого этtringита (тригидросульфалюмината кальция) и протекает по реакции:



Экспериментально установлено, что с участием ГКАК в этtringит связывается до 100 % гипса за время гидратации 6 ч. При длительности гидратации около одних суток исходные компоненты в реакционных смесях вообще не обнаруживаются при температуре процесса от 20 до 60 °С. Повышение температуры оказывает заметное влияние на скорость связывания гипса только в первые часы гидратации и независимо от температуры за 6 ч твердения взаимодействие компонентов в рассматриваемой системе приводит к небольшому увеличению объема твердой фазы, которое в дальнейшем стабилизируется. Таким образом, возникают физико-химические предпосылки для создания высокоактивных быстротвердеющих композиций с использованием реагентов, синтезируемых в системах глиноземного производства.

На этой основе была разработана технология получения быстротвердеющего безусадочного цемента типа Rapid-SFS [10]. При использовании рядового клинкера, двухводного гипса и заводской пробы ГКАК в лабораторных условиях был получен быстротвердеющий цемент с улучшенными на 20-25 % характеристиками по сравнению с цементом Rapid-SFS. При этом добавка ГКАК в количестве 2-2,5 % и соответствующего количества гипса приводят к образованию в процессе гидратации дополнительного количества этtringита, обуславливающего способность твердеющих цементных структур к расширению. Изучение цементов с малыми добавками ГКАК показало, что усадочные деформации в них отсутствуют. Можно полагать, что возникающие на ранних стадиях твердения цементов незначительные расширения позволяют полностью компенсировать собственные внутренние напряжения и обеспечить повышение прочности цемента в этот период. Сравнительные исследования показали, что снижение прочностных характеристик быстротвердеющих цементов на стадии опытно-промышленных испытаний связаны с более грубым помолом клинкера вследствие открытого цикла работы мельниц. Использование замкнутого цикла дает возможность в производственных условиях увеличить удельную поверхность измельченного клинкера с 3500 до 5000-5500 см²/г и существенно улучшить условия гидратации его компонентов. При этом прочность продукта в первые сутки твердения возрастет до 32 МПа, что отвечает стандарту суперцемента VeryRapid.

С использованием ГКАК связан и заметный эффект минерализации при обжиге портландцементного клинкера, основанный на его взаимодействии с фосфогипсом. В ходе освоения этой технологии было установлено, что при введении фосфогипса на стадии домола нефелинового (белитового) шлама его взаимодействие с ГКАК завершается образованием низкоосновного сульфалюмината, обладающего пониженной реакционной способностью вследствие адсорбированной на поверхности ГКАК щелочи:



При домоле шлама заметная доля щелочи переходит в жидкую фазу и в дальнейшем при введении фосфогипса в конечную шламово-известняковую шихту она не лимитирует процесс кристаллизации этtringита. Способ синтеза карбо-сульфоалюминатного минерализатора был внедрен на Пикалевском цементном заводе, что способствовало устойчивому выпуску портланд-

цемента высокого качества [6]. Прочность клинкера на сжатие увеличилась на 3-4 МПа. Стойкость футеровки в зоне клинкерообразования повысилась с 45 до 180 сут., а расход топлива сократился на 1 %. Отличное образование гранул клинкера в сочетании с пониженным пылевыводом существенно упростили процесс автоматического управления технологическим режимом работы цементных печей.

Второе крупное направление использования ГКАК хорошо известно благодаря внедрению на предприятиях по производству глинозема из нефелинового сырья, в результате чего стал возможен выпуск продукции высокого качества. Фундаментальные основы этой технологии были глубоко проработаны в 70-х–80-х годах XX в., что позволило установить особенности механизма осаждения гидрограната кальция при взаимодействии алюминатных растворов с ГКАК [7-9, 14]. Это позволяет устойчиво получать в производственных условиях алюминатные растворы с кремниевым модулем выше 5000 единиц и обеспечивает выпуск высококачественной продукции, но не отвечает достижению истинного равновесия в системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$. В то же время приближение к состоянию равновесия может минимизировать расход известкового компонента, а необходимость выпуска продуктов еще большей чистоты связана с их использованием в высокотехнологичных секторах экономики.

Решение этой проблемы в значительной степени заключается в снятии кинетических ограничений, возникающих при гетерогенных химических взаимодействиях по топохимическому механизму. Как известно, все пересыщенные растворы по термодинамической способности к образованию устойчивого кристаллического зародыша разделяются на лабильную и метастабильную области. В первом случае центры кристаллизации возникают самопроизвольно, для чего необходим выход системы за пределы метастабильной области, что имеет существенные ограничения для малорастворимых соединений и проявляется в виде индукционного периода неопределенной длительности.

Согласно теории М.Фольмера, полное соответствие структуры затравки осаждаемому соединению обеспечивает его кристаллизацию при любых пересыщениях в пределах метастабильной области. При структурном несоответствии работа образования кристаллического зародыша достигает максимума и процесс осаждения возможен только при выходе за пределы метастабильной области. Таким образом, для снятия кинетических ограничений в процессе глубокого обескремнивания алюминатных растворов необходимо введение затравочного материала, структурно близкого к гидрогранату кальция, являющегося единственным устойчивым продуктом в данной системе. Понятным и технически предпочтительным решением является введение в качестве затравки оборотного гидрогранатового шлама в сочетании с оптимальным способом подачи ГКАК. На рис.3 приведены

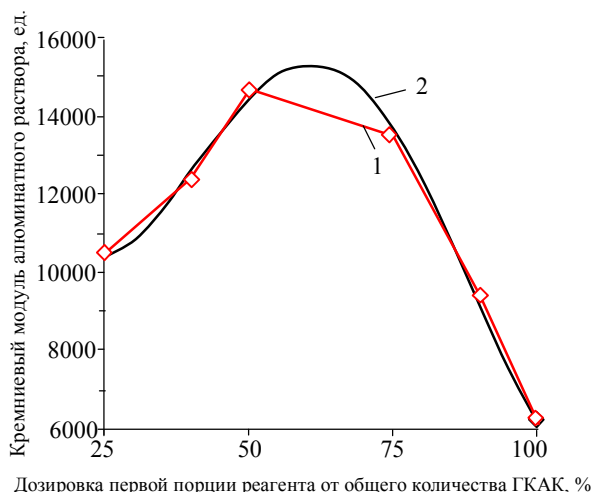


Рис.3. Показатели обескремнивания алюминатного раствора при дробном введении обескремнивающего реагента в зависимости от доли ГКАК, вводимого последовательными порциями

1 – экспериментальные данные; 2 – результаты математической обработки; $y = 0,023x^4 - 0,6003x^3 + 49,987x^2 - 1506,9x + 25371$; $R^2 = 0,9966$

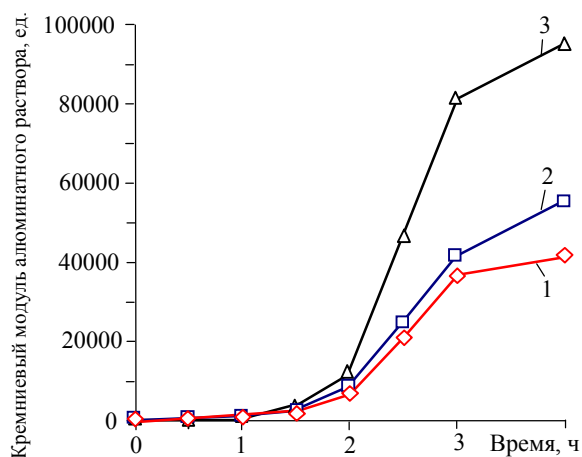


Рис. 4. Показатели обескремнивания алюминатного раствора при дробном введении реагента в зависимости от природы известкового компонента, использованного при синтезе ГКАК

1 – известковое молоко; 2 – природный известняк; 3 – фосфомел

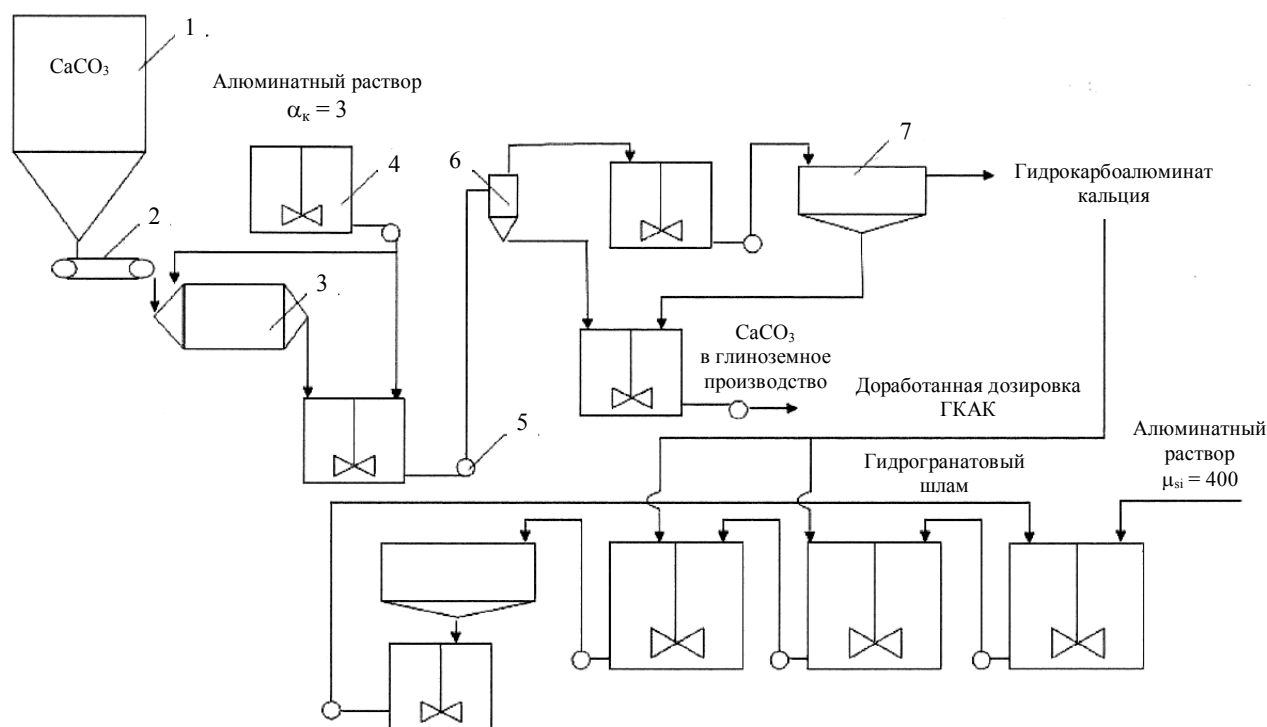


Рис.5. Принципиальная аппаратурно-технологическая схема синтеза ГКАК и глубокого обескремнивания алуминатных растворов

1 – бункер известковых материалов; 2 – питатель с весовым дозатором; 3 – мельница; 4 – мешалка; 5 – центробежный насос; 6 – гидрокласификатор; 7 – сгуститель

показатели осуществления 2-й стадии обескремнивания алуминатных растворов с дробным введением ГКАК при дозировке 7 г/л в пересчете на содержание активного оксида кальция. При этом первая порция ГКАК варьируется в диапазоне от 100 до 25 % от общего количества, а оставшееся количество реагента дозируется после экспозиции установленной длительности. Полученные результаты позволяют определить условия введения ГКАК, обеспечивающие оптимальное соотношение скорости его разложения и взаимодействия продуктов разложения с алуминатным раствором при участии гидрогранатового шлама. Увеличение длительности процесса до 4 ч в полной мере подтверждает автокаталитический характер процесса с подходом системы к состоянию технологического равновесия и соответствующего кинетике, подчиняющейся уравнению Колмогорова–Ерофеева (рис.4). При этом существенное влияние на показатели процесса оказывает природа известкового компонента, связанная с крупностью частиц, а следовательно, с удельной поверхностью и активностью материала [8].

Выполненные исследования по технологии синтеза ГКАК и глубокого обескремнивания алуминатных растворов определяют принципиальные аппаратурно-технологические решения, адаптированные к существующим способам переработки низкокачественного алюминийсодержащего сырья (рис.5).

Выводы

1. Широкий диапазон составов и высокая активность метастабильных фаз в системе $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O-CO}_2(\text{SO}_2)$ создают научную базу для их эффективного синтеза и применения в металлургии, производстве вяжущих веществ и функциональных материалов, что вселяет надежду на широкомасштабное применение сульфо-карбоалюминатов щелочно-земельных металлов не только в уже известных и зарекомендовавших себя технологиях, но и в других областях народного хозяйства.

2. Показано, что эффективность синтеза ГКАК с применением неизбежного карбоната кальция определяется использованием алуминатных растворов с повышенным содержанием свободной каустической щелочи для смещения равновесия системы в сторону образования гид-



роксида кальция и его последующей конверсии в ГКАК. При этом применение известковых материалов высокой дисперсности способствует улучшению показателей синтеза и создает предпосылки для использования известковых шламов и химически осажденного карбоната кальция, образующихся в различных технологических процессах.

3. Установлены условия дозировки ГКАК в процессе обескремнивания алюминатных растворов, обеспечивающие оптимальное соотношение скорости его разложения и взаимодействия продуктов разложения с алюминатным раствором при участии гидрогранатового шлама. Это подтверждает автокаталитический характер процесса, подчиняющийся кинетике топохимического взаимодействия с подходом системы к состоянию технологического равновесия.

Благодарность. Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (регистрационный номер проекта 11.4098.2017/ПЧ от 01.01.2017).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бричкин В.Н. Спекание известняково-нефелиновой шихты с добавкой рискорритовых пород Хибинского массива / В.Н.Бричкин, М.В.Черкасова, А.М.Гуменюк // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2016. № 2. С. 95-99.
2. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2011 году» / А.В.Акимов, О.С.Березнер, Н.В.Дудкин и др. // Аэрогеология. 2012. № 121. 129 с.
3. Обогащение лежалых хвостов флотации апатит-нефелиновых руд / В.М. Сизяков, Ю.П. Назаров, В.Н. Бричкин, Е.В. Сизякова // Обогащение руд. 2016. № 2. С. 33-40.
4. О некоторых закономерностях совместной кристаллизации гидрокарбо- и сульфоалюминатных фаз кальция и магния в системе $MgO-CaO-Al_2O_3-Na_2O-CO_2-SO_3-H_2O$ / В.М.Сизяков, А.Е.Исаков, В.О.Захаржевская, О.А.Борзенко // Цветные металлы. 2001. № 12. С. 28-32.
5. Патент 1556525 РФ. Способ получения ненасыщенного твердого раствора ангидрида серной кислоты и (или) угольной кислоты в четырехкальциевом гидроалюминате / В.М.Сизяков, Х.А.Бадалянц, И.М.Костин, Е.А.Исаков. Опубл. 15.12.1994. Бюл. № 12.
6. Патент 2215703 РФ. Сырьевая смесь для производства портландцементного клинкера / В.М.Сизяков, В.Н.Бричкин, Д.В.Кузнецов и др. Опубл. 10.11.2003. Бюл. № 31.
7. Патент 2560412 РФ. Способ обескремнивания алюминатных растворов / В.М.Сизяков, В.Н.Бричкин, Е.В.Сизякова, В.В.Васильев. Опубл. 20.08.2015. Бюл. № 23.
8. Патент 2560413 РФ. Способ глубокого обескремнивания алюминатных растворов / В.М. Сизяков, В.Н. Бричкин, Е.В. Сизякова, В.В. Васильев. Опубл. 20.08.2015. Бюл. № 23.
9. Сизяков В.М. Модернизация технологии комплексной переработки кольских нефелиновых концентратов на Пикалевском глиноземном комбинате // II Международный конгресс «Цветные металлы – 2010». Красноярск: ООО «Версо», 2010. С. 367-378.
10. Сизяков В.М. Научные основы и технология получения новых материалов с добавками гидрокарбоалюминатов кальция / В.М.Сизяков, В.И.Корнеев // Труды Международной конференции. М.: Изд-во МГУ, 2000. С. 515-521.
11. Сизяков В.М. Повышение качества глинозема и попутной продукции при комплексной переработке нефелинов / В.М.Сизяков, В.И.Корнеев, В.В.Андреев. М.: Металлургия, 1986. 111 с.
12. Сизяков В.М. Повышение комплексности переработки нефелинового сырья на основе содовой конверсии белитового шлама / В.М.Сизяков, В.Н.Бричкин, Р.В.Куртенков // Обогащение руд. 2016. № 1. С. 34-39.
13. Сизяков В.М. Химико-технологические закономерности процессов спекания щелочных алюмосиликатов и гидрохимической переработки спеков // Записки Горного института. 2016. Т. 217. С. 102-112.
14. Тейлор Х. Химия цемента. М.: Мир, 1996. 560 с.
15. Финин Д.В. Использование бурого угля на переделе спекания глиноземного комбината / Д.В.Финин, С.Н.Горбачев, М.А.Кравченя // IV Международный конгресс «Цветные металлы – 2013». Красноярск: ООО «Версо», 2013. С. 420-425.
16. Черкасова М.В. Современные тенденции в переработке низкокачественного алюминиевого сырья и их влияние на развитие минерально-сырьевой базы производства глинозема / М.В.Черкасова, В.Н.Бричкин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 19. С. 167-172.
17. Sine Bøgh Skaarup. Dry Sintering of Nepheline – A New More Energy Efficient Technology / Sine Bøgh Skaarup, Y.A.Gordeev, V.V.Volkov // Light Metals. 2014. Vol.1. P. 111-116.

Авторы: В.М.Сизяков, д-р техн. наук, профессор, kafmetall@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия) В.Н.Бричкин, д-р техн. наук, зав. кафедрой металлургии, kafmetall@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 10.02.2017

Статья принята к публикации 26.04.2018.