

УДК 662.7.004.18

ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВЫСОКОКРЕМНИСТЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

© 2015 В.С. Римкевич, А.А. Пушкин, И.В. Гиренко

Институт геологии и природопользования ДВО РАН

Поступила редакцию 27.05.2015

На основе теоретических и экспериментальных исследований процессов гидрохимической переработки высококремнистых техногенных отходов тепловых электростанций выявлены оптимальные условия получения нанодисперсного аморфного кремнезема, глинозема, красного железисто-оксидного пигмента и других товарных продуктов. Разработан эффективный метод комплексного извлечения различных полезных компонентов из электромагнитной фракции угольной золы.

Ключевые слова: высококремнистые техногенные отходы, гидрохимическая переработка, комплексное извлечение, аморфный кремнезем, глинозем

В настоящее время в Российской Федерации ежегодно на тепловых электростанциях (ТЭЦ) сжигается 650 млн. т. угля, вследствие чего образуется 300 млн. т. высококремнистых техногенных отходов в виде золы и шлаков. Хранение золошлаковых отходов представляет серьезную экологическую и экономическую проблему. Под хранение золошлаковых отходов ТЭЦ в России отчуждено более 20 тыс. км² земельных участков, на которых находится 1,3-1,5 млрд. т. этих техногенных отходов. Содержащие различные полезные компоненты, золошлаковые отвалы переполнены, и проблема по утилизации является весьма актуальной. Существующие методы переработки позволяют извлекать незначительные количества ценных компонентов, содержащихся в золошлаковых отвалах. В то же время по вещественному составу высококремнистые техногенные отходы можно рассматривать как комплексное месторождение нерудных и рудных полезных ископаемых. Оно находится на поверхности, не требует расходов на добычу из недр, запасы значительны и постоянно увеличиваются.

Цель работы: теоретическое и экспериментальное изучение процессов переработки высококремнистых техногенных отходов и разработка гидрохимического метода комплексного извлечения различных полезных компонентов.

Методика экспериментальных исследований. Большими перспективами для комплексной переработки высококремнистых техногенных

отходов обладает золоотвал Благовещенской ТЭЦ, расположенный в 3 км западнее ТЭЦ в пади Горбуниха, которая использована в качестве естественного резервуара для хранения золы. Четыре котла Благовещенской ТЭЦ потребляют ежегодно около 1 млн. т. угля, годовое поступление золыных отходов на золоотвал составляет 150 тыс. т, и в настоящее время их объем превышает 3 млн. т. Для экспериментального изучения из золоотвала были отобраны 3 пробы общим весом 141 кг, которые после сушки были разделены на магнитную, электромагнитную и немагнитную фракции. Средняя влажность проб составляла 39,5% по массе. Среднее содержание магнитной фракции составляет 9,1%, электромагнитной – 88,7%, немагнитной – 2,2% по массе. Магнитная фракция на 50-70% представлена шариками магнетита сизовато-черного цвета; в электромагнитной фракции преобладают прозрачные и полупрозрачные частицы раскристаллизованного пузырчатого стекла силикатного состава и их шлакоподобные агрегаты, присутствуют зерна полевых шпатов и кварца с включениями магнетита и гематита; в немагнитной фракции наблюдаются зерна кварца, полевых шпатов и частицы несгоревшего угля.

Объектом исследования являлась электромагнитная фракция золы состава, мас. %: SiO₂ – 54,27; Al₂O₃ – 21,01; Fe₂O₃ – 8,09; TiO₂ – 0,66; CaO – 8,24; MnO – 0,30; MgO – 2,49; Na₂O – 0,40; K₂O – 1,23; P₂O₅ – 0,08; SO₃ – 0,27; п.п.п. – 2,91. Перед опытами исходный материал измельчался до размеров менее 0,25 мм. Для переработки электромагнитной фракции золы, состоящей по данным рентгенофазового анализа в основном из минералов кварца (SiO₂) и муллита (Al₆Si₂O₁₃), применялись водные растворы гидрофторида (NH₄HF₂) и фторида (NH₄F) аммония, аммиачная вода (NH₄OH) и соляная кислота (35% HCl). Исходный материал растирали и помещали в тефлоновые тигли или чашки. Затем приливали водные растворы фторидов

Римкевич Вячеслав Сергеевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией наукоемких технологий переработки минерального сырья. E-mail: vrimk@yandex.ru

Пушкин Александр Андреевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории наукоемких технологий переработки минерального сырья. E-mail: pushkin@ascnet.ru

Гиренко Ирина Витальевна, научный сотрудник лаборатории наукоемких технологий переработки минерального сырья. E-mail: girenko66@inbox.ru

аммония и выдерживали в термостате при заданных температурах и времени продолжительности опытов. Полученные продукты разделяли путем фильтрования. Выщелачивание оксида железа осуществляли разбавленной соляной кислотой в аппарате из нержавеющей стали, пиролиз проводили в лабораторной установке. Синтез аморфного кремнезема, гидроксида алюминия и оксида железа проводили в гидролизном аппарате, выполненном из фторопласта. Регенерацию аммиачной воды осуществляли в устройстве из фторопласта, восстановление NH_4HF_2 и соляной кислоты проводили в лабораторном выпаривателе-кристаллизаторе. Для синтеза глинозема применяли электропечь специальной конструкции.

Исходное сырье, промежуточные фазы и конечные продукты исследовали химическим, рентгенофазовым, спектральным и электронно-микроскопическими методами анализов, применяемыми в Аналитическом центре минералого-геохимических исследований ИГиП ДВО РАН. Химический анализ на содержание элементов (Si, Al, Fe, Na, K и др.) в пробах проводили на спектрометре BRUKER S4 PIONEER. Определение содержания фтора и аммиака осуществляли после отгонки H_2SiF_6 и NH_3 титрованием полученных растворов нитратом тория и серной кислотой, соответственно. Для

рентгенофазового анализа применяли рентгеновский дифрактометр MAXIMA XRD-700 ($\text{CuK}\alpha$ -излучение, $\lambda=1,54060\text{\AA}$) с базой данных для фазового анализа ICDD PDF 2008. Эмиссионный спектральный анализ микропримесей проводили на спектрографе СТЭ-1 со скрещенной дисперсией со стандартным определением 44 элементов. Электронно-микроскопические исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе GSM-6390 LV JEOL с определением порообразующих элементов. Размеры наночастиц определяли на атомно-силовом микроскопе SOLVER P47 в Институте автоматизации и процессов управления ДВО РАН (г. Владивосток). Расчеты термодинамических параметров, констант скорости и энергии активации химических реакций осуществляли с применением программ, разработанных на основе приложения Microsoft Access 2007.

Обсуждение результатов экспериментов.

Перед проведением экспериментальных работ был проведен термодинамический расчет вероятности протекания химических реакций комплексной переработки электромагнитной фракции угольной золы. Термодинамические расчеты проводились с использованием данных [4, 5]. По данным расчетов (табл. 1) реакции протекают в сторону образования конечных продуктов.

Таблица 1. Расчетные изменения энергии Гиббса (ΔG , кДж) для гидрохимических реакций переработки высококремнистых техногенных отходов

№ п/п	T, °C	25	50	75	100
1		$\text{SiO}_2 + 3\text{NH}_4\text{HF}_2 = (\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3$			
	ΔG	-34,4	-46,0	-57,7	-69,3
2		$\text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{NH}_4\text{HF}_2 = 2(\text{NH}_4)_3\text{AlF}_6 + 3\text{H}_2\text{O}$			
	ΔG	-340,4	-340,0	-339,5	-339,1
3		$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{NH}_4\text{HF}_2 = 2(\text{NH}_4)_3\text{FeF}_6 + 3\text{H}_2\text{O}$			
	ΔG	-287,6	-288,3	-290,0	-289,7
4		$\text{CaO} + \text{NH}_4\text{HF}_2 = \text{CaF}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3$			
	ΔG	-157,9	-165,3	-172,8	-180,2
5		$\text{MgO} + \text{NH}_4\text{HF}_2 = \text{MgF}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3$			
	ΔG	-1694,0	-1735,0	-1775,0	-1816,0
6		$(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6 + 4\text{NH}_4\text{OH} = \text{SiO}_2\downarrow + 6\text{NH}_4\text{F} + 2\text{H}_2\text{O}$			
	ΔG	-48,7	-38,8	-29,0	-19,1
7		$2\text{NH}_4\text{F} = \text{NH}_4\text{HF}_2 + \text{NH}_3\uparrow$			
	ΔG	0,5	-4,1	-7,8	-12,0
8		$(\text{NH}_4)_3\text{AlF}_6 + 3\text{NH}_4\text{OH} = \text{Al}(\text{OH})_3\downarrow + 6\text{NH}_4\text{F}$			
	ΔG	-153,2	-146,3	-139,5	-132,6
9		$2(\text{NH}_4)_3\text{FeF}_6 + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{NH}_3\uparrow + 6\text{HF}\uparrow$			
	ΔG	797,3	734,3	637,8	608,4
10		$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{HCl} = 2\text{FeCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$			
	ΔG	-40,0	-31,1	-21,9	-13,0
11		$2\text{FeCl}_3 + 6\text{NH}_4\text{OH} = \text{Fe}_2\text{O}_3\downarrow + 6\text{NH}_4\text{Cl} + 3\text{H}_2\text{O}$			
	ΔG	-476,2	-495,9	-515,7	-535,4
12		$\text{NH}_4\text{Cl} = \text{HCl}\uparrow + \text{NH}_3\uparrow$			
	ΔG	93,0	86,0	79,1	72,1

На основании полученных экспериментальных данных по массе образовавшегося гексафторсиликата аммония за определенные промежутки времени при заданных температурах и концентрациях растворов гидроdifторида и фторида аммония, а также по данным химических анализов на элементы в продуктах реакций вычисляли кинетические параметры процессов – константы скорости и энергии активации. Степень образования продуктов реакций, необходимую для дальнейших расчетов, определяли по формуле: $\alpha = m/m_{\text{расч}}$, где m – масса образовавшегося продукта в момент времени t , $m_{\text{расч}}$ – теоретически возможное его количество. Расчет констант скоростей реакций гидрохимической переработки проводился в предположении о следовании экспоненциальному закону изменения концентрации от времени. Энергию активации рассчитывали по уравнению Аррениуса для констант скоростей методом наименьших квадратов по линеаризованной форме этого уравнения. Ошибки при расчетах кинетических параметров не превышают 2,0% относительных.

Экспериментально исследованы кинетические кривые гидрохимического выщелачивания при температурах 25, 75 и 100°C, исходной концентрации 25 мас.% NH_4HF_2 или NH_4F в водных растворах и временах выдержки от 0,5 до 7,5 ч. Реакции идут в нормальных условиях даже без перемешивания реакционной смеси, подогрев которой существенно уменьшает продолжительность фторидного выщелачивания. Температура кипения концентрированных водных растворов фторидов аммония составляет 108°C. Количество фторидов аммония в растворах соответствует стехиометрическому. Уменьшение их концентрации приводит к интенсивному кипению растворов, а увеличение – к образованию избытка водного раствора аммиака и ухудшению качества конечного продукта. По экспериментальным данным хорошо растворимый в воде гексафторсиликат аммония ($(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$) отделяется путем фильтрования от выпадающего при pH = 5,5-6,0 шламового осадка, состоящего из гексафторалюмината и гексафторферрата аммония ($(\text{NH}_4)_3\text{FeF}_6$), фторидов кальция, магния и других примесей.

В табл. 2 приведены значения констант скоростей и энергий активации для различных температур при 25 мас.% концентраций водных растворов гидроdifторида и фторида аммония. Анализ экспериментальных и кинетических данных (табл. 2) свидетельствует, что максимальное извлечение гексафторсиликата (более 98,5 мас.%) достигается при температуре 100°C, времени выдержки 3 ч и при концентрации в водном растворе 25 мас.% NH_4HF_2 . При уменьшении температуры и времени выдержки степень извлечения $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ уменьшается. Замена гидроdifторида на фторид аммония в водном растворе при аналогичной концентрации

также приводит к уменьшению степени извлечения гексафторсиликата аммония. В 25 мас.% водном растворе фторида аммония при температуре 100°C и времени выдержки 3 ч степень извлечения $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ составляет 86,3 мас.%, и достигает максимума (более 98 мас.%) при выдержке 6,5 ч.

Таблица 2. Значения констант скорости (K_c) и энергии активации (E_a) реакций гидрохимической переработки высококремнистых техногенных отходов 25 мас.% раствором гидроdifторида и фторида аммония

Обработка раствором NH_4HF_2		Обработка раствором NH_4F	
$T, ^\circ\text{C}$	$K_c, \text{мин}^{-1}$	$T, ^\circ\text{C}$	$K_c, \text{мин}^{-1}$
25	0,001155	25	0,0005470
75	0,005882	75	0,003607
100	0,010565	100	0,009737
$E_a, \text{кДж/моль}$	27,4		34,9

При гидрохимическом выщелачивании осуществляются реакции 1-5 основных компонентов с водными растворами гидроdifторида аммония (табл. 1). Отделенный раствор $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ выпаривается с образованием кристаллического гексафторсиликата аммония, а летучие компоненты NH_3 и H_2O улавливаются в устройстве, заполненном водным раствором, с образованием аммиачной воды. Далее из шламового осадка выщелачивается растворимый в воде $(\text{NH}_4)_3\text{AlF}_6$ при pH=6-6,5, который путем фильтрования отделяется от труднорастворимого гексафторферрата аммония, фторидов кальция и магния. Примесные соединения щелочных металлов при гидрохимическом выщелачивании образуют фториды натрия и калия, хорошо растворимые в воде, которые на разных этапах также выделяются из реакционной массы. Отделенный раствор $(\text{NH}_4)_3\text{AlF}_6$ выпаривается с образованием кристаллического гексафторалюмината аммония. По данным рентгенофазового, химического и спектрального анализов образовавшиеся кристаллические фазы $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ и $(\text{NH}_4)_3\text{AlF}_6$ содержат незначительное количество примесей – менее 10⁻² мас. % (Fe, Ti, Na, K и другие). На следующем этапе гексафторсиликат и гексафторалюминат аммония подвергаются гидролизу в воднощелочных растворах.

Водный раствор гексафторсиликата аммония (3–33 мас. % $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$) взаимодействует с аммиачной водой (25 % мас. NH_3) при температурах 20–80°C по реакции 6 до образования осадка при pH=8–9, который выдерживали при заданной температуре в течение 1 ч. Затем осадок путем фильтрования отделяется от раствора фторида аммония, который поступает на регенерацию гидроdifторида аммония по реакции 7. В результате происходит синтез нанодисперсного аморфного кремнезема высокой химической чистоты со средним

размером наночастиц 17–89 нм. По данным анализа на атомно-силовом микроскопе наименьшего среднего значения (17 нм) размер наночастиц достигает в условиях синтеза при исходной концентрации 3 мас.% $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ и температуре 80°C; наночастицы увеличиваются до средних размеров 61 нм и 89 нм при концентрациях 20 и 33 мас.% гексафторсиликата аммония соответственно для аналогичной температуры. При концентрации 3 мас.% $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ понижение температуры синтеза до 20°C способствует увеличению среднего размера наночастиц до 33 нм. Изменение концентрации и температуры в указанных интервалах позволяет увеличивать удельную поверхность нанодисперсных порошков аморфного кремнезема от 92 до 508 м²/г, при этом удельный объем пор увеличивается от 0,096 до 0,255 см³/г.

В разбавленных растворах при концентрации 3 мас.% гексафторсиликата аммония и температуре 80°C достигается максимальное извлечение аморфного кремнезема, равное 92,36 мас.%, которое уменьшается до 71,47 мас.% при концентрации 33 мас.% $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ для аналогичной температуры. При концентрации 3 мас.% $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ и температуре 20°C степень извлечения аморфного кремнезема составляет 82,35 мас.%, и она уменьшается до 68,53 мас.% с повышением концентрации $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ до 20 мас.% для аналогичной температуры.

Спектральный анализ нанодисперсных порошков аморфного кремнезема подтверждает наличие в них минимального количества вредных примесей (менее 10⁻² мас.%); на дифрактограммах наблюдается рентгеноаморфное гало с отсутствием кристаллических фаз. По данным химического анализа в аморфном кремнеземе содержится 99,99 мас.% SiO₂ и обнаружены следы фтора [6]. В водном растворе (0,5–3 мас.% $(\text{NH}_4)_3\text{AlF}_6$) гексафторалюминат аммония взаимодействует с аммиачной водой (25 мас.% NH₃) при температурах 20–80°C по реакции 8 до образования осадка гидроксида алюминия $(\text{Al}(\text{OH})_3)$ при pH = 8–9, который выдерживали при заданной температуре в течение 1 ч. Затем осадок путем фильтрования отделяется от раствора фторида аммония, который поступает на стадию регенерации (реакция 7). В результате прохождения процесса (реакция 8) происходит образование микрочастиц гидроксида алюминия с размерами фракций от 1 до 10 мкм 2–10%, от 10 до 50 мкм 10–60%, микрочастицы крупнее 50 мкм – более 30% по массе. Спектральный анализ микрочастиц гидроксида алюминия показал наличие в них минимального количества микропримесей (менее 10⁻¹ мас.%), на дифрактограммах фиксируется кристаллическая фаза гиббсит. По данным химического анализа в гидроксида алюминия содержится 64,98 мас.% Al₂O₃, суммарное содержание щелочей (Na₂O + K₂O) не превышает 0,1 мас.%. В разбавленных растворах при концентрации 0,5 мас.%

$(\text{NH}_4)_3\text{AlF}_6$ и температуре 80°C достигается максимальное извлечение гидроксида алюминия, равное 97,10 мас.%, которое уменьшается до 88,91 мас.% при концентрации 3 мас.% $(\text{NH}_4)_3\text{AlF}_6$ для аналогичной температуры. При концентрации 0,5 мас.% $(\text{NH}_4)_3\text{AlF}_6$ и температуре 20°C степень извлечения гидроксида алюминия составляет 91,88 мас.%, и она уменьшается до 77,62 мас.% с повышением концентрации $(\text{NH}_4)_3\text{AlF}_6$ до 2 мас.% для аналогичной температуры.

Математическая обработка результатов экспериментов проводилась в предположении о том, что массовая степень извлечения аморфного кремнезема или гидроксида алюминия зависит от температуры по уравнению Аррениуса [7]: $a = a_0 \exp(-E_a/RT)$, а энергия активации вычислялась по формуле: $E_a = R\Delta \ln a / \Delta(1/T)$. Средняя величина E_a составляет 1,6 кДж/моль для реакции 6 и 1,75 кДж/моль для реакции 8, что свидетельствует о протекании этих реакций в диффузионной области. Далее гидроксид алюминия подвергается кальцинации по реакции



при температурах 1100–1200°C в течение 20–40 мин с получением кондиционного металлургического глинозема, состоящего по данным рентгенофазового анализа из смеси фаз: 60–80% γ -Al₂O₃ и 20–40% α -Al₂O₃. По данным химического, электронно-микроскопического и спектрального анализов, полученный глинозем содержит 99,8 мас.% Al₂O₃ и следующие примеси (мас.%): SiO₂ – 0,02; Fe₂O₃ – 0,03; TiO₂ – следы; CaO, MgO, Na₂O и K₂O не обнаружены, и соответствует маркам Г0 и Г1 [8], и из него путем электролитического восстановления извлекается первичный технический алюминий марок А5–А85.

По известной методике [9] шламовый осадок подвергается термической обработке перегретым водяным паром при 350–650°C в течение 1,5–2,5 час с образованием оксида железа по реакции 9, а фториды кальция и магния не подвергаются пиро-гидролизу. Далее полученный осадок выщелачивают разбавленным раствором соляной кислоты при температуре 50–60°C и выдержке 2–3 ч с образованием раствора хлорида железа (FeCl₃) по реакции 10, который путем фильтрования отделяется от нерастворимого в соляной кислоте остатка, состоящего по данным рентгенофазового анализа из фторидов кальция и магния. Полученный концентрат поступает на дальнейшую переработку.

Хлорид железа подвергается гидролизу в водных растворах под действием аммиачной воды (25 мас.% NH₃) при температурах 20–80°C и pH = 7–8 по реакции 11 с образованием красного железистого пигмента (Fe₂O₃), который выпадает в осадок, выдерживается при заданной температуре не менее 1 ч и отделяется путем фильтрования от

хлорида аммония (NH_4Cl). Из NH_4Cl регенерируются при температурах выше 338°C соляная кислота и аммиак по реакции 12, которые поступают на стадии технологического процесса.

На рис. 1 изображена технологическая схема выщелачивания высококремнистых техногенных отходов под действием растворов гидрофторида аммония. На схеме в скобках обозначены химические реакции комплексной переработки электромагнитной фракции (ЭМ) угольной золы, вероятности прохождения которых подтверждены термодинамическими расчетами. Применяемые дополнительные компоненты легко восстанавливаются с отсутствием твердых, жидких и газообразных отходов, что позволяет многократно использовать их в технологическом процессе (реакции 7, 12). При комплексной переработке 100 кг высококремнистых техногенных отходов теоретически можно извлечь 54,27 кг аморфного кремнезема, 21,01 кг глинозема, 8,09 кг красного железоксидного

пигмента и другие полезные компоненты. В лабораторных условиях при фторидной гидрохимической переработке электромагнитной фракции угольной золы степень извлечения аморфного кремнезема составляет 96,1%, глинозема – 96,8%, красного железоксидного пигмента – 95,2%, регенерация гидрофторида аммония, аммиачной воды и соляной кислоты превышает 95%. Среднемировая стоимость (\$/кг) золы составляет 0,06, гидрофторида аммония – 2,0, аммиачной воды – 0,1, соляной кислоты – 0,2, а конечных продуктов аморфного кремнезема – 5,0, глинозема – 0,45, гексафторсиликата аммония – 4,0, красного железоксидного пигмента – 3,0. Замкнутый технологический процесс с высокой степенью восстановления применяемых реагентов и высокая стоимость конечных продуктов обеспечивают экономическую рентабельность гидрохимического метода и экологическую безопасность промышленного производства и окружающей среды.

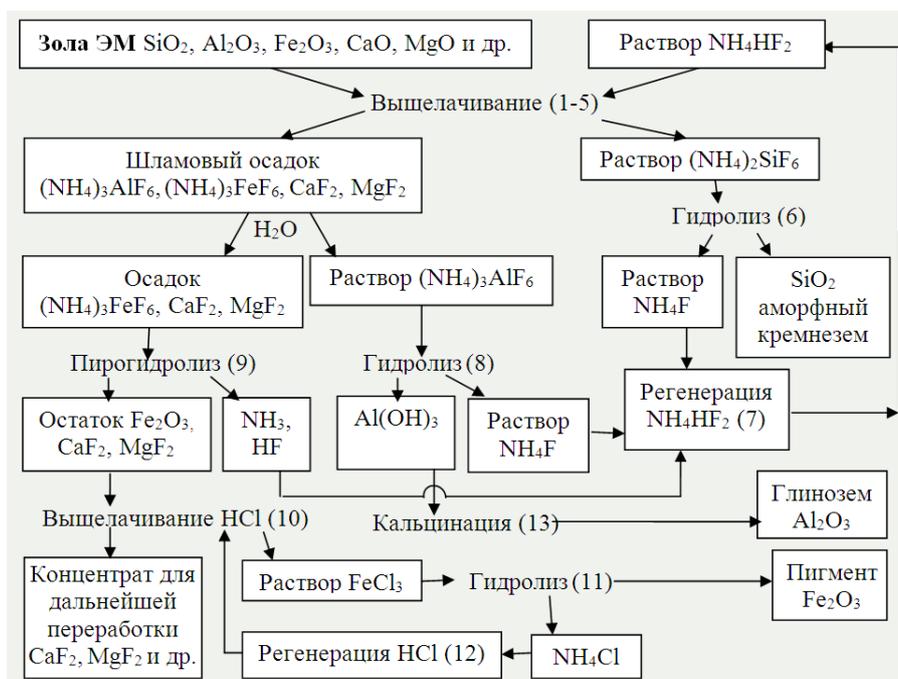


Рис. 1. Технологическая схема гидрохимической переработки высококремнистых техногенных отходов

Аморфный кремнезем широко используется в резинотехнической, строительной, медицинской и косметических отраслях промышленности, для производства полупроводникового кремния, основы оптоволоконного кабеля и других целей. Глинозем широко применяется для производства технического алюминия электролитическим способом, специальных видов керамики и электрокерамики, изготовления конструкционных и диэлектрических материалов для машиностроительной, энергетической и электронной отраслей промышленности. Обладающий сильными огнестойкими и биоцидными свойствами гексафторсиликат аммония

находит применение в деревообрабатывающей, пищевой, химической и других отраслях промышленности. Красный железоксидный пигмент предназначается для получения высококачественных красок, бумаги, резины, пластмасс и других продуктов.

Выводы: теоретическими и экспериментальными исследованиями выявлены оптимальные физико-химические условия переработки высококремнистых техногенных отходов в водных растворах гидрофторида и фторида аммония, аммиачно воды и соляной кислоты. В результате разработан гидрохимический метод извлечения

нанодисперсного аморфного кремнезема, гидроксида алюминия, глинозема, красного железистого пигмента и других полезных компонентов из угольной золы. Внедрение разработанного метода позволит перерабатывать большие объемы высококремнистых техногенных отходов тепловых электростанций в более экологически чистых и технологически безопасных промышленных условиях и значительно уменьшить материальные и энергетические затраты получения конечной продукции по сравнению с существующими способами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-05-00239а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Черепанов, А.А. Комплексная переработка золошлаковых отходов ТЭЦ / А.А. Черепанов, В.Т. Кардаш // Геология и полезные ископаемые мирового океана. 2009. № 2. С. 98-115.
2. Делицын, Л.М. Необходимость новых подходов к использованию золы ТЭС / Л.М. Делицын, А.С. Власов // Теплоэнергетика. 2010. № 4. С. 49-55.
3. Фомина, Е.Ю. Исследование возможности переработки золошлаковых отходов ТЭС металлургическими методами / Е.Ю. Фомина, О.С. Артемова // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 8. С. 273-277.
4. Лидин, Р.А. Справочник по неорганической химии / Р.А. Лидин, Л.П. Андреева, В.А. Молочко. – М.: Химия, 1987. 320 с.
5. Равдель, А.А. Краткий справочник физико-химических величин / А.А. Равдель, А.М. Пономарева. – Ленинград: Химия, 1983. 244 с.
6. Римкевич, В.С. Синтез и свойства наночастиц аморфного SiO₂ / В.С. Римкевич, А.А. Пушкин, И.В. Гиренко // Неорганические материалы. 2012. Т. 48, № 4. С. 423-428.
7. Стромберг, А.Г. Физическая химия / А.Г. Стромберг, Д.П. Семченко. – М.: Химия, 1999. 528 с.
8. Лайнер, А.И. Производство глинозема / А.И. Лайнер, Н.И. Еремич, Ю.А. Лайнер, И.З. Певзнер. – М.: Металлургия, 1978. 344 с.
9. Дьяченко, А.Н. Разделение кремний-железо-медно-никелевого концентрата фтороаммониевым методом на индивидуальные оксиды / А.Н. Дьяченко, Р.И. Крайденко // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 311, № 3. С. 38-41.

**PROSPECTS OF COMPLEX PROCESSING OF THE HIGH-SILICEOUS
TECHNOGENIC WASTE OF THERMAL POWER PLANTS**

© 2015 V.S. Rimkevich, A.A. Pushkin, I.V. Girenko

Institute of Geology and Nature management FEB RAS

On the basis of theoretical and experimental studies of processes of hydrochemical processing of high-siliceous technogenic waste of thermal power plants, the optimum conditions of receiving nanodisperse amorphous silicon dioxide, alumina, a red iron-oxidizing pigment and other commodity products are revealed. The effective method of complex extraction the various useful components from electromagnetic fraction of coal ashes is developed.

Key words: *high-siliceous technogenic waste, hydrochemical processing, complex extraction, amorphous silicon dioxide, alumina*

Vyacheslav Rimkevich, Candidate of Geology and Mineralogy, Associate Professor, Chief of the Laboratory of Knowledge-Intensive Technologies of Mineral Raw Materials Processing.

E-mail: vrimk@yandex.ru

Alexander Pushkin, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Research Fellow at the Laboratory of Knowledge-Intensive Technologies of Mineral Raw Materials Processing.

E-mail: pushkin@ascnet.ru

Irina Girenko, Research Fellow at the Laboratory of Knowledge-Intensive Technologies of Mineral Raw Materials Processing.

E-mail: girenko66@inbox.ru