

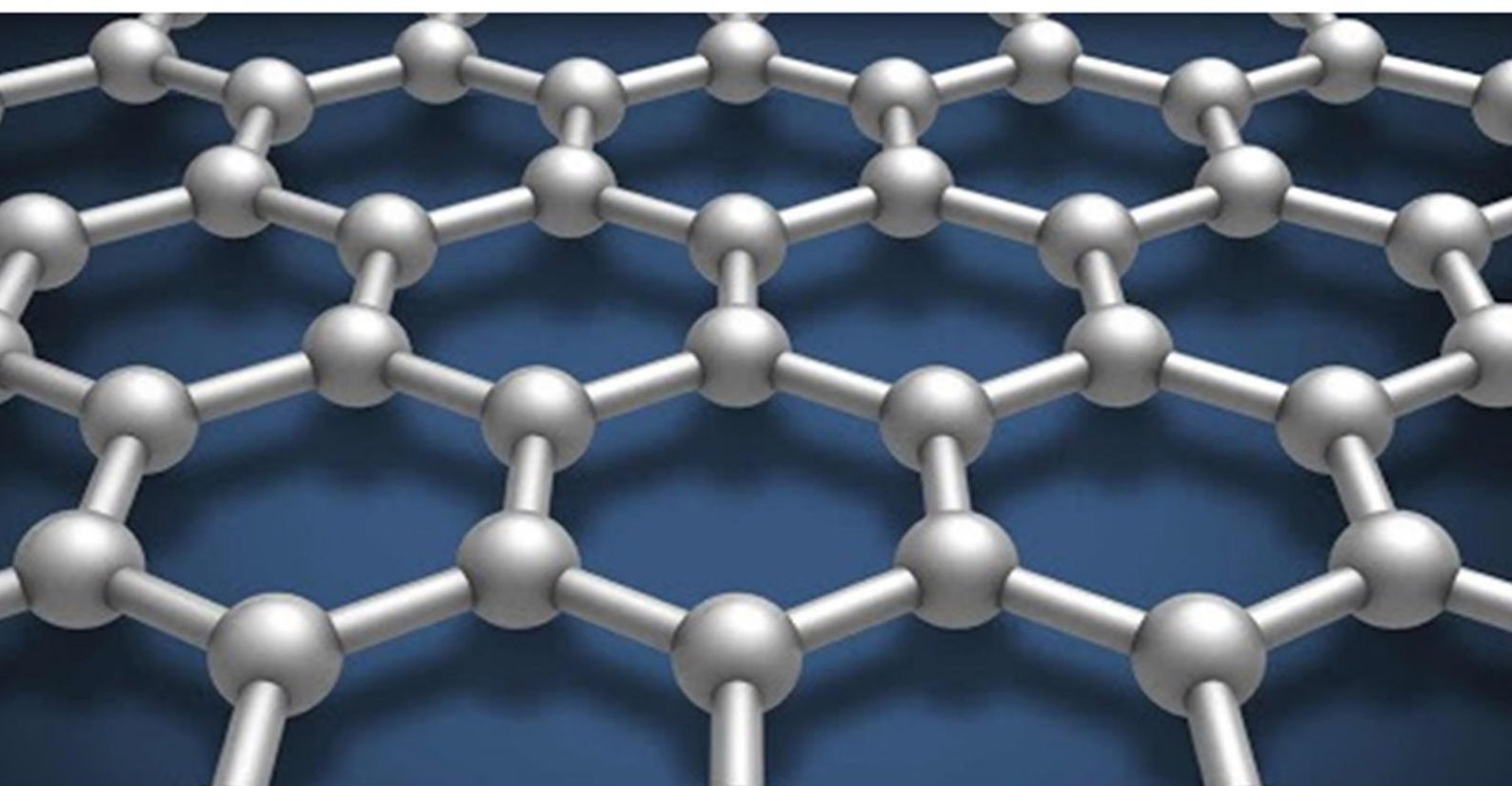
ISSN 2091-5527

№ 3/2026

O'zbekiston

Kompozitsion **M**ateriallar

Ilmiy-texnikaviy va amaliy jurnali



Узбекский научно-технический и производственный журнал
Композиционные материалы

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ ЗОЛЫ С РАСТВОРАМИ ФТОРИСТОВОДОРОДНОЙ КИСЛОТЫ

Хамдамова Ч.Х., Бекпулатов Х.О., Абед. Н.С., Камолов Т.О.

ГУ “Фан ва тараккиёт”

Аннотация. В статье рассмотрены закономерности взаимодействия основных минеральных компонентов золы техногенного происхождения с растворами фтористоводородной кислоты. Особое внимание уделено процессам разрушения алюмосиликатной матрицы, растворению кремний-, алюминий-, железо- и кальцийсодержащих фаз, а также переходу скандия в жидкую фазу. Показано, что эффективность кислотного выщелачивания определяется минеральным составом золы, степенью аморфизации алюмосиликатной матрицы, концентрацией фторид-ионов, температурой, продолжительностью контакта и соотношением твердой и жидкой фаз. Фторид-ионы обладают высокой химической активностью по отношению к кремнийсодержащим фазам и способны способствовать разрушению труднорастворимых алюмосиликатов. Это создает предпосылки для перевода редких и рассеянных элементов, в том числе скандия, в раствор с последующим их селективным извлечением ионно-обменными или экстракционными методами. На основании рассмотренных закономерностей предложена принципиальная схема предварительного кислотного вскрытия золы перед концентрированием скандия.

Ключевые слова: зола, техногенные отходы, скандий, фтористоводородная кислота, фторид-ионы, выщелачивание, алюмосиликаты, кремнезем, ионный обмен, редкие металлы.

Введение. Современные энергетические и металлургические предприятия образуют значительные количества техногенных минеральных отходов, среди которых особое место занимает зола. Несмотря на преимущественно минеральный состав, зольные отходы могут содержать повышенные концентрации ценных компонентов, включая редкие и рассеянные элементы [1].

Одним из перспективных компонентов золы является скандий, который представляет значительный интерес вследствие его применения в специальных сплавах, керамике, электронике и других высокотехнологичных областях. Однако извлечение скандия непосредственно из золы осложняется его низкой концентрацией и нахождением в сложной алюмосиликатной матрице.

Целью исследования является изучение закономерностей взаимодействия компонентов зольных техногенных отходов с растворами фтористоводородной кислоты и определение условий, обеспечивающих эффективное вскрытие алюмосиликатной матрицы и перевод скандия в раствор для его последующего селективного извлечения и концентрирования.

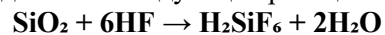
В качестве объекта исследования использовали зольные техногенные отходы, содержащие скандий и комплекс минеральных компонентов. Перед проведением экспериментов образцы золы подвергали сушке, измельчению и фракционированию.

Результаты и их обсуждение. Основными компонентами многих видов золы являются SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 ; также присутствуют соединения Ca, Mg, Ti и другие элементы. Например, для исследованной в литературе

угольной золы содержание SiO_2 составляло около 60–62 %, Al_2O_3 — 23–25 %, Fe_2O_3 — 3–4 %. Высокое содержание кремнезема и образование труднорастворимых алюмосиликатных фаз существенно ограничивают эффективность обычного кислотного выщелачивания. В связи с этим представляет интерес изучение поведения компонентов золы в присутствии фторид-ионов.

В минеральной структуре золы кремний преимущественно связан в виде кварца, аморфного кремнезема и алюмосиликатных фаз. Кроме того, значительная часть алюминия может находиться в составе муллита.

Взаимодействие кремнезема с фтористоводородной кислотой принципиально можно представить следующей реакцией:

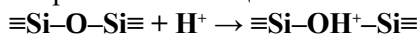


Образование растворимых фторкремниевых форм способствует разрушению кремнийсодержащей части алюмосиликатной матрицы.

Для алюмосиликатных фаз процесс является более сложным, поскольку одновременно происходят разрушение Si–O–Al связей, образование фторсодержащих комплексов и переход алюминия в раствор.

Особое значение имеет разрушение муллита, который является одной из наиболее устойчивых алюмосиликатных фаз золы. Исследования кислотной переработки угольной золы показывают, что HF способен эффективно разрушать муллитовую структуру, однако экологическая опасность фтористоводородной кислоты существенно ограничивает возможность ее промышленного применения [2].

При контакте зола с фторидсодержащей кислотной средой первоначально происходит протонирование поверхностных кислородных центров минеральных частиц:



Одновременно фторидные формы взаимодействуют с кремнийсодержащими центрами. В результате происходит ослабление структуры Si–O–Si и Si–O–Al связей.

Упрощенно процесс можно представить следующим образом:

алюмосиликатная матрица → разрушение Si–O–Al связей → образование растворимых фторидных/фторосиликатных форм → высвобождение Al, Fe, Sc и других компонентов.

Таким образом, действие HF заключается не только в растворении отдельных минеральных фаз, но и в структурном вскрытии минералогической матрицы зола.

Это имеет принципиальное значение при извлечении скандия, поскольку скандий может быть связан с алюмосиликатной, железистой или стеклообразной фазой.

Поведение основных компонентов зола при кислотно-фторидном вскрытии: кремний, алюминий, железо, кальций и скандий [3].

Кремний является одним из наиболее важных компонентов, определяющих поведение зола в HF-содержащей среде. Его взаимодействие сопровождается разрушением Si–O связей и образованием фторсодержащих соединений. Высокая реакционная способность фторидов по отношению к кремнию может способствовать вскрытию плотной минеральной структуры.

Алюминий в золе находится преимущественно в алюмосиликатных фазах. При разрушении последних алюминий переходит в жидкую фазу.

Известно, что добавление фторидов в кислотную среду повышает эффективность растворения алюминия из зола; в одном из исследований добавление NaF способствовало разрушению муллитсодержащей фазы и увеличению извлечения Al.

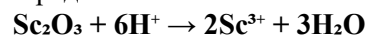
Железо может присутствовать в виде оксидов и сложных алюмосиликатных соединений. В кислой среде Fe-содержащие фазы могут переходить в раствор, что необходимо учитывать при последующей селективной концентрации скандия. Высокая концентрация Fe в растворе может отрицательно влиять на селективность сорбции Sc³⁺ и поэтому требует последующей очистки раствора.

Кальцийсодержащие соединения характеризуются относительно высокой

реакционной способностью в кислотной среде. Их растворение может существенно изменять состав выщелачивающего раствора и кислотность системы. Следовательно, содержание Ca в исходной золе необходимо учитывать при выборе условий предварительного вскрытия.

Скандий представляет особый интерес. В отличие от основных компонентов зола, его содержание обычно невелико, поэтому главной задачей первой стадии является не получение высокочистого скандиевого продукта, а максимально полный перевод Sc в раствор при последующем отделении от основных компонентов матрицы.

Упрощенно переход скандия из твердой фазы можно представить:



В реальной многокомпонентной системе форма нахождения скандия определяется кислотностью, концентрацией фторидов, составом раствора и присутствием комплексообразующих компонентов.

Эффективность взаимодействия зола с HF определяется несколькими взаимосвязанными факторами.

Концентрация кислоты. Увеличение кислотности обычно способствует разрушению реакционноспособных минеральных фаз. Однако чрезмерное увеличение концентрации реагента не обязательно приводит к пропорциональному увеличению извлечения целевого компонента.

Температура. Повышение температуры, как правило, ускоряет кинетику химического взаимодействия и диффузию реагента в поры частиц. Однако оптимальная температура должна определяться экспериментально с учетом устойчивости образующихся соединений.

Продолжительность процесса. На начальной стадии растворение происходит наиболее интенсивно за счет доступных поверхностных фаз. По мере протекания процесса скорость может снижаться вследствие образования труднорастворимого остатка или уменьшения площади реакционноспособной поверхности.

Размер частиц. Измельчение зола увеличивает удельную поверхность и уменьшает диффузионный путь реагента. Поэтому степень предварительного измельчения является существенным фактором процесса.

Соотношение твердой и жидкой фаз. При увеличении объема жидкой фазы улучшается контакт реагента с частицами, однако одновременно возрастает объем

технологического раствора, который впоследствии необходимо перерабатывать.

Закономерность перехода скандия в раствор. Для оценки эффективности процесса целесообразно использовать показатель степени извлечения:

$$\eta_{Sc} = \frac{C_{Sc}V}{m_{Sc,0}} \times 100\%$$

где:

C_{Sc} — концентрация скандия в выщелачивающем растворе;

V — объем раствора;

$m_{Sc,0}$ — исходное содержание скандия в навеске золы;

η_{Sc} — степень извлечения скандия.

При этом необходимо одновременно определять степень перехода в раствор Al, Fe, Ca, Mg, Ti и Si.

Особое значение имеет не только максимальное извлечение Sc, но и коэффициент селективности:

$$K_{Sc/M} = \frac{D_{Sc}}{D_M}$$

где: D_{Sc} и D_M характеризуют распределение скандия и сопутствующего металла между твердой и жидкой фазами.

Именно этот показатель позволяет оценить пригодность полученного раствора для последующей ионообменной очистки.

Принципиальная технологическая схема имеет следующий вид:

Зола → измельчение → кислотнo-фторидное вскрытие → фильтрация → продуктивный раствор → очистка от Fe/Al/Ca → ионно-обменная сорбция Sc → десорбция → концентрат Sc → получение Sc_2O_3 .

Такой подход является более рациональным, чем попытка непосредственно выделить скандий из исходной золы, поскольку концентрация скандия мала, а содержание основных компонентов значительно выше.

В современных исследованиях также рассматриваются альтернативные системы выщелачивания скандия из золы, включая фторидсодержащие среды и другие методы химического вскрытия. При этом применение фторидов может значительно ускорять разрушение алюмосиликатной матрицы.

Несмотря на высокую химическую эффективность HF, использование фтористоводородной кислоты связано с серьезными экологическими и промышленными рисками. Поэтому для промышленной технологии необходимо предусматривать замкнутый цикл реагентов, герметичное оборудование, контроль фторсодержащих выбросов и нейтрализацию соответствующих технологических потоков.

По этой причине перспективным направлением является исследование более мягких фторидных систем, например фторидных добавок в сочетании с минеральными кислотами. В литературе показано, что введение NaF в кислотную среду может повышать растворение алюминия из золы, способствуя разрушению муллита.

Заключение. Установленные закономерности показывают, что взаимодействие компонентов золы с фтористоводородной кислотой определяется сложным комплексом физико-химических процессов, включающих протонирование поверхности, разрушение Si–O–Si и Si–O–Al связей, образование фторсодержащих соединений и перевод компонентов минеральной матрицы в жидкую фазу. Наиболее существенное значение фторид-ионов заключается в разрушении устойчивой алюмосиликатной матрицы и облегчении высвобождения элементов, связанных с этой матрицей. Это делает фторидно-кислотное вскрытие перспективной предварительной стадией переработки золы при извлечении скандия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борбат В.Ф., Михайлов Ю.Л., Адеева Л.Н. и др. Исследование возможности обогащения золы-уноса ТЭЦ по редким и цветным металлам для их последующего извлечения // Химия и химическая технология. 1999. Т. 42. Вып. 5. С. 86-90.
2. Kamolov T.O., Sharipov Kh.T., Borbat V.F., Akhmedova F.S., Bozorov A.N. Thermodynamic Evaluation of Possibility of Fluoride Processing of Some Types of Technogenic Raw Material // ISSN: 2350-0328 International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology Vol. 7, Issue 12, December 2020. Copyright to IJARSET www.ijarset.com - 15940.
3. Шарипов Х.Т., Кадилова З.Ч., Турсебеков А.Х., Шарипов Р.Х., Камолов Т.О. Минералогические и аналитические исследования золошлаковых отходов Ангренской ТЭС// Конференция «Инновация-2010», Ташкент, 2010.-С.165.
4. Шарипов Х.Т., Камолов Т.О., Эрназаров Т., Турсебеков А.Х. Утилизация золошлаковых отходов (ЗШО) тепловых электростанции // Материалы VIII-медународной научно-технической конференции горно-металлургический комплекс: достижения, проблемы и современные тенденции развития. – Навои. – 2015.
5. Камолов Т.О., Рахматова Н.Ш., Рахмонова М. Элементный и фазовый состав золошлаковых отходов ТЭС // Респ. Узбекистан. НГМК. НГГИ. Материалы республиканской научно-техн. конф. «горно-металлургический комплекс: проблемы и их решения». –Алмалык. – 2015.

Muhiddinov B.F., Razzaqov H.Q., Amonov M.R., Nazarov S.I. Sanoat oqova suvlarini tozalashda sorbent, koagulyant va flokulyantlarni bosqichma-bosqich qo'llashning fizik-kimyoviy va texnologik asoslari	207
Хамдамова Ч.Х., Бекпулатов Х.О., Абед. Н.С., Камолов Т.О. Закономерности взаимодействия компонентов золы с растворами фтористоводородной кислоты	209

7. Вести из лаборатории

Yuldasheva N.S., Yusupova L.A. Investigation of the physicochemical properties of road bitumen obtained from local bituminous rocks	212
Хайдаров И.Ю., Негматов С.С., Юлдашев Д.Я. Роль и свойства компонентов в составе фрикционной композиции	216
Гулямов С.М., Уринбоев У.Б., Тураходжаев Н.Дж., Турахужаева А.Н., Носирхужаев И.А. Влияние количества газовых горелок на теплообменный процесс при плавке алюминия	217
Юлдашев Н.Б., Негматов С.С., Раупова Д.Н., Негматова К.С., Мусабеков Д.Х. Исследование жидкой пробы масляных эмульсий методом спектрометрии	218
Салимова С.А., Негматов С.С., Толипов Н.Х., Панжиев О.Х., Солиев Р.Х., Муллажанов Т.Т., Аликабулов Ш. Разработка составов композиционных облегченных тампонажных смесей на основе местного сырья и микрокремнезема и исследование их реологических свойств	219
Негматова К.С., Раупова Д.Н., Негматов С.С., Юлдашев Н.Б., Мусабеков Д.Х. Микроскопическое исследование действия композиционного деэмульгатора при разрушении масляных эмульсий	220
Файзиев М.М., Каршиев М. Марказдан кочма куч ёрдамида цилиндр шаклдаги филтрларни олишда контейнер тезлигини аниқлаш	222
Jo'rayev M.M., Bekchanov D.J., Muxamediyev Muxtarjan G. Mahalliy xomashyo - polivinilxlorid asosida yangi sulfokationitning ayrim fizik-kimyoviy xossalari	224
Юлдашев Н.Б., Негматов С.С., Негматова К.С., Раупова Д.Н., Мусабеков Д.Х. Исследование влияния композиционного деэмульгатора на поверхностное натяжение на границе масло–вода	226
Халимжанов Т.С. Исследование влияния модификации органоминеральными наполнителями и ультразвуковой обработкой на антифрикционно-износостойкие свойства КПП	227
Пирвалиев Д.А., Тураходжаев Н.Дж., Уринбоев У.Б., Гулямов С.М., Носирхужаев И.А. Влияние процесса плавки на качество получаемых отливок	228
Салимова С.А., Негматов С.С., Толипов Н.Х., Панжиев О.Х., Солиев Р.Х., Муллажанов Т.Т., Аликабулов Ш. Исследование возможности модификации тонкодисперсных исходных органоминеральных добавок содержащих цемент, микрокремнезем, водорастворимый полимерный порошок и водорастворимые полимеры	229
Халимжанов Т.С., Турсунбаев И.К. Исследования влияния технологических факторов на триботехнические свойства композиционных полимерных материалов	230
Негматов С.С., Юлдашев Н.Б., Мусабеков Д.Х., Негматова К.С., Раупова Д.Н. Исследование взаимодействия коллоидных систем с электролитами	231
Кучкарова М.Х. Коррозионной способности разработанных композиционных СОЖ на металлических пластинках	233
Хайдаров И.Ю., Негматов С.С., Юлдашев Д.Я. Перспективы создания композиционных материалов фрикционного назначения с использованием минеральных наполнителей с специфическими свойствами	234