

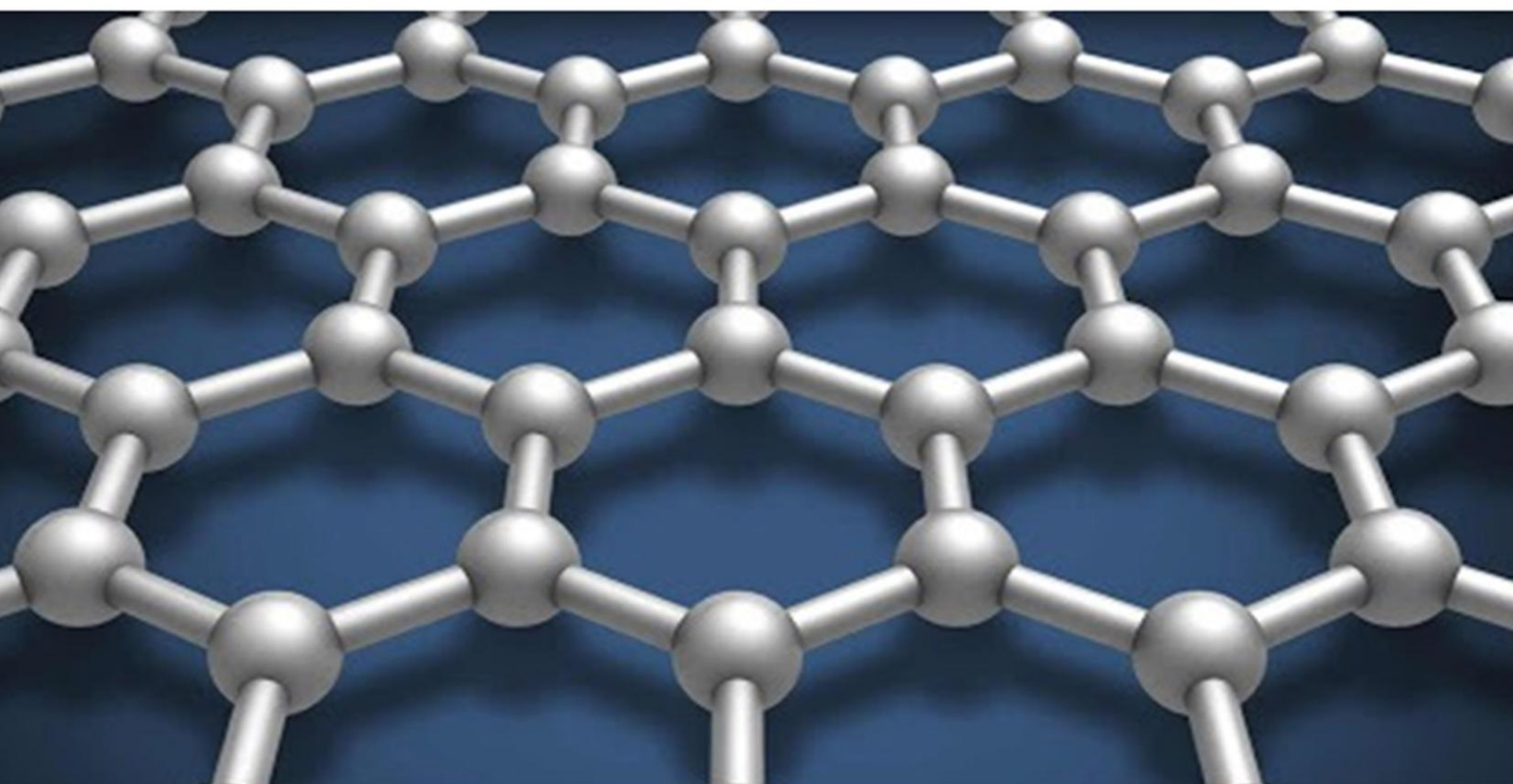
ISSN 2091-5527

№ 3/2026

O'zbekiston

Kompozitsion **M**ateriallar

Ilmiy-texnikaviy va amaliy jurnali



Узбекский научно-технический и производственный журнал
Композиционные материалы

СПОСОБЫ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛЫ ОТ СЖИГАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ

Очилов Э.А., Сайфиева П.О., Хамдамов Д.Х., Камолов Т.О.

ГУ “Фан ва тараккиёт”

Аннотация. Зола, образующаяся при сжигании энергетических углей, является многокомпонентным техногенным сырьем, содержащим значительное количество кремния, алюминия, железа, кальция, магния и титана, а также ряд редких и рассеянных элементов. Накопление золы в отвалах приводит к изъятию земельных ресурсов и формированию потенциальных источников вторичного загрязнения окружающей среды. В связи с этим разработка эффективных способов комплексной переработки золы представляет научный и практический интерес. В настоящей работе рассмотрены основные физические, гидрометаллургические, пирометаллургические и комбинированные методы переработки золы энергетических углей. Особое внимание уделено кислотному, щелочному и фторидсодержащему вскрытию алюмосиликатной матрицы, а также последующему селективному извлечению ценных компонентов. Рассмотрена возможность использования данной схемы для извлечения скандия из золы. Установлено, что эффективность переработки определяется минералогическим составом золы, формой нахождения целевого элемента, параметрами выщелачивания и селективностью последующей стадии разделения.

Ключевые слова: энергетический уголь, зола, золошлаковые отходы, техногенное сырье, переработка, выщелачивание, алюмосиликаты, скандий, фториды, ионообменная сорбция.

Введение. Сжигание энергетических углей является одним из наиболее распространенных способов производства тепловой и электрической энергии. Одновременно с получением энергии образуются значительные объемы золы и золошлаковых материалов. Традиционное складирование данных отходов связано с рядом экологических и экономических проблем, включая отчуждение земель, пылеобразование, загрязнение поверхностных и подземных вод и необходимость постоянного содержания золоотвалов [1].

Вместе с тем зола энергетических углей обладает сложным минеральным составом и может рассматриваться как перспективный источник вторичного сырья. Основу ее состава обычно образуют кремний-, алюминий-, железо- и кальцийсодержащие соединения. Кроме основных компонентов, в золе могут концентрироваться редкие и рассеянные элементы. Особый научный интерес представляет возможность извлечения скандия. Скандий широко используется при производстве специальных алюминиевых сплавов, керамических материалов, электронных компонентов и других высокотехнологичных продуктов. При этом традиционная добыча скандия из природного минерального сырья ограничена низким содержанием элемента и сложностью его концентрирования.

В связи с этим переработка золы энергетических углей как вторичного источника скандия является перспективным направлением развития ресурсосберегающих технологий.

Целью исследования является разработка и научное обоснование эффективного способа переработки золы от сжигания энергетических

углей с использованием химического вскрытия алюмосиликатной матрицы и последующего селективного извлечения скандия.

Объектом исследования являются золы техногенные отходы, образующиеся при сжигании энергетических углей.

Результаты и обсуждение. Перед проведением химического исследования образцы золы подвергаются сушке, измельчению и классификации по размеру частиц. Для установления химического состава определяется содержание основных компонентов: Si, Al, Fe, Ca, Mg, Ti, а также Sc и других редких элементов.

Минералогический состав исходной золы целесообразно исследовать методом рентгенофазового анализа. Морфологию и элементное распределение отдельных частиц можно изучать методами электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом [2].

После завершения процесса выщелачивания твердую и жидкую фазы разделяют фильтрованием. В полученном растворе определяют концентрации скандия и сопутствующих элементов.

Степень извлечения элемента рассчитывают по выражению:

$$\eta_i = \frac{C_i V}{m_i} \times 100\%$$

где: C_i — концентрация элемента в растворе, мг/л; V — объем раствора, л;

m_i — исходное содержание элемента в исследуемой навеске, мг.

Физическая переработка является первой стадией комплексного использования золошлаковых отходов. Основными операциями

являются измельчение, классификация, магнитная сепарация и, в отдельных случаях, флотационное обогащение. Измельчение повышает удельную поверхность материала и облегчает последующее взаимодействие минеральных компонентов с реагентами. Классификация позволяет разделить золу на фракции, отличающиеся по гранулометрическому и химическому составу.

Магнитная сепарация может применяться для выделения железосодержащих магнитных фаз. Удаление части железа на предварительной стадии потенциально способствует повышению селективности последующего извлечения скандия. Однако физические методы, как правило, не обеспечивают полного извлечения скандия, поскольку данный элемент распределен в различных минеральных фазах. Поэтому их целесообразно рассматривать как подготовительную стадию. Кислотное выщелачивание является одним из наиболее распространенных гидрометаллургических методов переработки золы. В качестве реагентов могут использоваться серная, соляная и азотная кислоты. В кислой среде растворяются оксидные и карбонатные фазы, а также часть алюмосиликатных соединений. Для условной оксидной формы скандия процесс растворения можно представить: $\text{Sc}_2\text{O}_3 + 6\text{H}^+ \rightarrow 2\text{Sc}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$

Однако скандий в реальной золе не обязательно присутствует в виде самостоятельного оксида. Он может быть структурно связан с алюмосиликатной или железистой матрицей. Поэтому степень его извлечения зависит от эффективности разрушения исходной минеральной структуры.

К основным недостаткам кислотного выщелачивания относится совместное растворение значительных количеств Fe, Al, Ca и других компонентов. Это приводит к формированию многокомпонентного раствора и усложняет последующее выделение скандия.

Щелочное вскрытие представляет интерес прежде всего для высококремнистой и алюмосиликатной золы.

В щелочной среде происходит взаимодействие кремнийсодержащих компонентов с образованием растворимых или более реакционноспособных форм. Данный процесс может использоваться как предварительная стадия перед последующим кислотным выщелачиванием редких элементов.

Преимуществом метода является возможность направленного изменения структуры алюмосиликатной матрицы. Недостатком является относительно высокий расход щелочных реагентов и необходимость последующей обработки щелочных растворов.

Особое внимание заслуживает использование фторидсодержащих растворов для разрушения устойчивых алюмосиликатных фаз. Фторид-ионы обладают высокой реакционной способностью по отношению к кремнийсодержащим соединениям. В случае использования HF взаимодействие с кремнеземом можно условно представить:



В результате происходит разрушение части кремнийсодержащей структуры, что способствует вскрытию алюмосиликатной матрицы. Экспериментальные исследования угольной золы показывают, что добавление фторида натрия к кислотной системе может повысить извлечение алюминия и способствовать разрушению муллита. Это подтверждает перспективность фторидов для химического вскрытия труднорастворимых фаз. Для извлечения скандия данный эффект имеет принципиальное значение, поскольку разрушение алюмосиликатной структуры может способствовать высвобождению Sc. Вместе с тем использование HF связано с высокой токсичностью и коррозионной активностью реагента. Поэтому для практической технологии необходимо рассматривать также более контролируемые фторидные системы, например сочетание минеральных кислот с фторидными добавками. В процессе химического вскрытия одновременно изменяется состояние нескольких компонентов золы.

Кремний участвует в разрушении алюмосиликатной матрицы и может переходить в раствор в виде различных фторсодержащих форм.

Алюминий высвобождается вследствие разрушения муллита и других алюмосиликатных фаз.

Железо растворяется преимущественно из оксидных и других железосодержащих фаз. Его высокое содержание в растворе может осложнять селективное извлечение Sc.

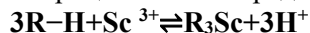
Кальций отличается относительно высокой растворимостью в кислотной среде и поэтому может быстро переходить в раствор.

Скандий является целевым компонентом. Его переход в раствор определяется степенью вскрытия минеральной матрицы и химическим состоянием элемента.

Таким образом, оптимальным режимом следует считать не максимальное растворение золы в целом, а условия, обеспечивающие высокий выход Sc при минимальном совместном растворении сопутствующих компонентов. После выщелачивания образуется многокомпонентный раствор, содержащий Sc^{3+} и значительные количества Fe^{3+} , Al^{3+} , Ca^{2+} и

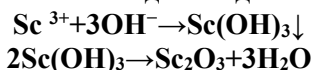
других ионов. Для концентрирования скандия могут применяться: ионообменная сорбция; экстракция органическими реагентами; осаждение; комбинированные методы. Особый интерес представляет ионообменная сорбция, позволяющая отделить скандий от основных компонентов раствора.

Обобщенно процесс можно представить:



После насыщения сорбента скандий десорбируют с получением более концентрированного раствора.

На следующей стадии возможно получение гидроксида, а затем оксида скандия:



На основании рассмотренных методов можно предложить следующую принципиальную схему комплексной переработки золы:

Зола энергетического угля → измельчение → классификация → магнитная сепарация → химическое вскрытие → фильтрация → очистка раствора → ионообменная сорбция Sc → десорбция → концентрат Sc → получение Sc_2O_3 .

Данная схема позволяет разделить процесс на две функционально различные стадии: вскрытие золы и перевод скандия в раствор; селективное концентрирование скандия из многокомпонентного раствора.

Такой подход позволяет снизить влияние основных компонентов золы на последующую стадию извлечения. Комплексная переработка золы энергетических углей имеет важное экологическое значение, поскольку позволяет уменьшить объемы складированных отходов и одновременно получать вторичное сырье. Однако применение химических реагентов сопровождается образованием жидких отходов, содержащих растворенные металлы, соли и, в случае применения фторидов, фторсодержащие

соединения. Поэтому при разработке промышленной технологии необходимо предусматривать: замкнутый цикл технологических растворов; регенерацию сорбентов; очистку сточных вод; нейтрализацию остаточных растворов; контроль содержания фторидов; минимизацию образования вторичных отходов.

Закключение. Зола от сжигания энергетических углей является перспективным вторичным сырьевым ресурсом для комплексного извлечения основных и редких компонентов. Физические методы переработки целесообразно использовать на стадии подготовки и предварительного обогащения материала, тогда как для вскрытия алюмосиликатной матрицы наиболее перспективными являются гидрометаллургические методы.

Кислотное и щелочное выщелачивание позволяют переводить значительную часть компонентов золы в раствор, однако сопровождаются совместным растворением большого количества примесей. Использование фторидсодержащих систем способствует более эффективному разрушению кремний- и алюминийсодержащих фаз, включая устойчивые алюмосиликаты.

Для извлечения скандия наиболее перспективной представляется комбинированная технология, включающая предварительную подготовку золы, химическое вскрытие, разделение твердой и жидкой фаз, очистку продуктивного раствора и последующее ионообменное концентрирование скандия. Таким образом, переработка золы энергетических углей позволяет одновременно решать две важные задачи — снижение экологической нагрузки от техногенных отходов и получение ценного вторичного сырья, содержащего скандий и другие редкие элементы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шаванов Н. Д., Коновалова Н. А., Панков П. П., Руш Е. А. Изучение состава и свойств золошлаковых смесей с целью их утилизации в строительной индустрии // Актуальные проблемы техносферной безопасности. Сборник тезисов научных трудов IV международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых, преподавателей, приуроченная к 45-летию кафедры «Промышленная экология и техносферная безопасность». - Ульяновск: УГТУ, 2022. - С. 134-137.
2. Камолов Т.О., Шарипов Х.Т., Туресебеков А.Х., Борбат В.В. Элементный и минералогический состав неорганических компонентов энергетических углей и золошлаковых отходов. Сб. трудов Респ.науч.-техн. конференции «Технологии переработки местного сырья и продуктов» с.132.
3. 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.
4. Tursunboy Kamolov, Muhayyo Khoshimkhanova, Muhtarama Bekmuratova, Nodira Rakhmatova, Barno Zhuraeva Sorption Extraction of Lanthanum from Ash and Slag Waste of Novo-Angren TPP // 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 - 15978.

3. Разработка и технология получения композиционных материалов

Негматова К.С. Технология флотационного обогащения медно-молибденовых руд с применением химических флотореагентов для извлечения медного концентрата	68
Xusenov A.Sh., Orazova Sh.Sh., Zokirov B.U., Kiyamova M.I., Raxmanberdiev G. Seritsin va inulin asosida kompozitsion plyonka olish va uning fizik-kimyoviy xossalari o'rganish	72
Саидова Ш.З., Каттаев Н.Т., Колядин В.Г., Акбаров Х.И. Синтез и характеристика гранулированного тройного сополимера 1-винилимидазола, акрилонитрила и дивинилбензола	75
Maxkamov B.G'. Vermikulit asosida olingan kompozitsion materialda benzol va suv bug'i adsorbsiyasi	79
Эшанкулова Г.Р., Ахмадов У.А. Тургунов Ф.Ф., Хасанов А.С. Ер остида танлаб эритиш усули билан уран қазиб олишда ҳосил бўладиган маҳсулдор эритмалардаги водород сульфидни фаолсизлантиришнинг самарали усулини ишлаб чиқиш	82
Bakhromova I.A., Vokhidova N.R. Synthesis of iron-modified chitosan for the purification of hydrogen sulfide waste from the oil and gas industry	85
Туляганова В.С. Разработка и исследование свойств композиционных кордиеритовых электрокерамических материалов на основе местного и вторичного сырья	87
Tursunkulov O.M., Gulyamov B.B., Sobitov M.A., Abduqahhorov F.I., Toxtabayev E.R., Uzakbergenov N.J., Bozorov S.S., Khojiev Sh.G. Effect of methane flow rate on the Raman characteristics and spatial uniformity of CVD graphene grown on high-purity copper at 1020 °C	91
Davlatova Z.Z., Safarov A.R., Abdiyeva F.I., Ixtiyarova G.A. <i>Apis mellifera</i> xitozani asosida suyuq neft tarkibidagi molibden va reniyni ajratib olish texnologiyasi	94
Очилов Э.А., Сайфиева П.О., Хамдамов Д.Х., Камолов Т.О. Способы переработки золы от сжигания энергетических углей	97

4. Прикладные, экономические и экологические аспекты применения композиционных материалов

Азимова Ш.А., Азимов Д.М. Перспективы вторичной переработки органических компонентов отходов щелочной очистки пирогаза	100
Sultanova N.S., Ismailova R.M., Ulliboboev A.M., Ismailov R.I. Tsellyuloza materiallarini olovga chidamli materiallarga aylantirish uchun vermikulit asosidagi olovga chidamli kompozitsiyaning tarkibini optimallashtirish	104
Шомуротов Ш.А., Содикова М.А., Абдурахмонов Ж.А., Ахмедов О.Р., Тураев А.С., Юлдашев Ж.М., Олимжонов Ж.У. Периодатное окисление декстрана и синтез оксимных производных путём нуклеофильного присоединения гидроксилламина	106
Razzoqov H.Q., Amonov M.R. Modifikatsiyalangan shofirkon bentoniti asosidagi kompozitsion sorbentlar va koagulyatsion tizimlar yordamida sanoat oqova suvlarini kompleks tozalash	110
Бозоров А.Н. Техногенные отходы предприятий металлургической отрасли и разработка технологии их переработки	112
Xokimov A.E., Eminov A.M., Kadirova Z.R., Xamdamova Sh.Sh. Sho'rsuv gilining mineralogik tarkibi va texnologik xususiyatlarini kompleks tadqiq etish	116
Nuriddinova G.A., Jalilov Sh.N. KMS va PAA ishtirokida melamin va gossipol bilan modifikatsiyalangan mochevina-formaldegid asosidagi yelimlovchi-bog'lovchining strukturaviy va termik xususiyatlari	120
Туляганова М.А., Маткаримов С.Т. Сравнительная оценка технологических схем извлечения технического теллура из медьэлектролитных шламов	124
Шомуротов Ш.А., Ахмедов О.Р., Тураев А.С., Юлдашев Ж.М., Олимжонов Ж.У., Туляшева М.А., Тураева Х.К. Восстановление оксимных производных декстрана и получение аминированного полисахарида	127
Амонова Н.М., Темиров Ў.Ш., Жўраев И.И. Оқова сув чўкиндиларини компостлашда органик моддалар, азот ва гумус моддаларининг ўзгариши	131
Очилов Э.А., Сайфиева П.О., Хамдамов Д.Х., Камолов Т.О. Исследование процесса извлечения скандия из зольных техногенных отходов с применением ионообменного сорбента	133