

УДК 622.772:662.613.13

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЗОЛОТА И ДРУГИХ ЦЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ УГЛЕЙ И ПРОДУКТОВ ИХ СЖИГАНИЯ



А. А. ЛАВРИНЕНКО,
зав. лабораторией, д-р техн. наук,
lavrin_a@mail.ru,
Институт проблем комплексного освоения
недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
Москва, Россия

Введение

В условиях истощения запасов легкообогатимых руд проблема расширения минерально-сырьевой базы России может быть решена путем вовлечения в промышленное использование нетрадиционных видов минерального сырья. Исследованиями, выполненными в России и за рубежом, установлено, что в ископаемых углях многих месторождений присутствует комплекс ценных элементов, которые рентабельно извлекать при содержании даже более низком, чем в промышленных рудах.

Однако уголь, даже имеющий повышенное содержание ценных металлов, рассматривается не как металлосодержащее сырье, а как энергетическое, из которого при полном использовании его энергетического потенциала можно извлекать ценные элементы, в частности благородные металлы (золото, серебро, платиноиды), редкие и редкоземельные элементы (лантан, иттрий, иттербий и др.).

Топливо-энергетический комплекс России все в большей степени направлен на использование углей не только в качестве энергетического сырья, но и на повышение комплексности их использования. К настоящему времени не обнаружены угли, из которых экономически эффективно можно извлекать потенциально ценные элементы (ЦЭ), кроме урана, без использования в первую очередь их энергетического потенциала. Вследствие этого сжигание углей с получением энергоресурсов, золы уноса и шлаков, обогащенных ЦЭ, является одним из способов комбинированного термохимического обогащения минерального сырья с целью концентрирования содержащихся в угле редких, благородных и других металлов в соответствующих продуктах переработки (зола, шлак, дымовые выбросы). До настоящего времени в России внедрена только одна технология попутного извлечения ценного компонента – германия, хотя его получение из угля составляет 20 % всего мирового производства этого металла [1].

Накопление золошлаковых отходов (ЗШО) в золоотвалах угольных теплоэлектростанций (ТЭС) России становится все более острой проблемой угольной отрасли и экономики страны. В Рос-

В работе представлено теоретическое и экспериментальное обоснование возможности и целесообразности извлечения благородных металлов и других элементов из дымовых выбросов сжигания углей, а также при выщелачивании из образующихся твердых продуктов сжигания. Показана представительность содержания металлов в золотосодержащих угольных месторождениях.

Ключевые слова: уголь, золото, зола, шлак, улавливание золота из дымов, золотосодержащий конденсат, твердофазная конденсация, выщелачивание, РЗЭ, элементный анализ, тиокарбамид.

DOI: 10.17580/gzh.2017.11.15

сии накоплено более 1,7 млрд т ЗШО и ежегодно образуется 30–40 млн т. До недавнего времени их рассматривали преимущественно как источники загрязнения окружающей среды, но в качестве ЗШО они являются ценным и возобновляемым техногенным ресурсом [1–4]. Основной коммерческий интерес представляют алюмосиликатные микросферы (АСМ), кремнезем (SiO_2), глинозем (Al_2O_3), черные, редкие, редкоземельные и благородные металлы, а также органическая несгоревшая часть углей. Проблема использования отходов сжигания углей как источника благородных металлов, редких, редкоземельных и рассеянных элементов представляет значительный научный и практический интерес.

Целью данной работы является научное обоснование и разработка процесса попутного извлечения благородных металлов и других ценных элементов из углей и продуктов их сжигания.

В связи с этим решали три основные задачи:

- обоснование возможности перевода благородных металлов в газовую фазу при термической обработке угля и последующего их конденсирования;
- выявление золотосодержащего угольного месторождения как сырьевого объекта для экономически обоснованного извлечения потенциально ценных элементов;
- разработка технологических основ извлечения золота и других ценных элементов из углей и продуктов их сжигания.

Результаты исследований

Присутствие различных микроэлементов в углях может влиять непосредственно на технологические параметры процессов их переработки или изменять свойства конечных продуктов этих процессов. Анализ опубликованных результатов исследований показал, что при сжигании углей золото может образовывать газообразные соединения, конденсирующиеся после охлаждения газообразных продуктов, выходящих из высокотемпературной зоны топки. Обнаружено, что в уловленных золых уносах после сжигания бурых углей некоторых месторождений содержание зо-

лота существенно выше, чем в исходном угле (в расчете на его золу) [5, 6]. Однако в литературных источниках отсутствует информация об условиях термообработки, благоприятствующих образованию газообразных соединений золота, и возможных типах этих соединений.

Для выяснения механизма миграции золота в продукты сжигания угля и для выбора эффективной технологии его извлечения необходима информация о механизме поведения золота в процессе сжигания углей и его фазовом переходе при последующем конденсировании дымовых выбросов.

Для относительной оценки вероятностных изменений фазового состояния золота и других элементов в процессе термопереработки углей провели термодинамическое моделирование поведения соединений золота, серебра и сопутствующих им других минеральных компонентов при сжигании бурых углей. Состав анализируемых углей соответствует составу бурого угля Назаровского месторождения Канско-Ачинского бассейна (КАБ) (уголь 1) в Красноярском крае и Павловского месторождения (уголь 2) в Приморском крае. Следует отметить, что результаты данного метода могут отличаться от экспериментальных вследствие игнорирования кинетических факторов. Расчеты были проведены по программе химической термодинамики GIBBS 4.5 Windows for Multiphase Equilibrium Calculations, которая позволяет определить поведение золота и других микроэлементов в равновесных условиях по данным термодинамического анализа [1, 7].

В процессе сжигания угля или его газификации возможно образование соединений, не заложенных в базу данных программы. Следовательно, сложно определить влияние новообразованных соединений на поведение изучаемых микроэлементов. Для более полного выявления основных закономерностей поведения золота в процессах сжигания, а также газификации угля, кроме данных по составу угля 1, в котором содержание золота принято 1,5 г/т, для сравнения в программу вносили данные по составу угля 2 с заведомо высоким содержанием золота.

В качестве исходных данных для углей 1 и 2 приняты следующие значения, % на рабочую массу: 32 W^r; 12 A^d; 39,3 С; 0,28 S; 0,56 N; 10,54 Si; 4,68 Al; 8,57 Fe; 15,5 Ca; 2,04 Mg; 0,28 K; 0,25 Na. Содержание микроэлементов, г/т: 5 V; 10,9 U; 3,3 Se; 300 Sr. Уголь 1, г/т: 1,5 Au, 9 Ag. Уголь 2, г/т: 7 Au; 46 Ag. Сжигание и охлаждение продуктов сжигания проводили при P = 0,1 МПа и коэффициенте избытка воздуха α = 1,2. Для газификации α = 0,3.

Результаты термодинамических расчетов по распределению золота и серебра в их соединениях, образующихся в окислительной среде, при моделировании процесса сжигания угля 1 и 2 свидетельствуют, что золото в заметной степени может переходить в газовую фазу при температуре сжигания более 1000 °С. Основным газообразным соединением золота является Au(g). Содержание золота в исходном угле оказывает влияние на степень образования его газообразных соединений (рис. 1, 2). Согласно данным, при 1000 °С быстрее летит золото из угля, в котором оно присутствует в меньшем количестве. Охлаждение продуктов сжигания до температуры менее 824 °С приводит к практически

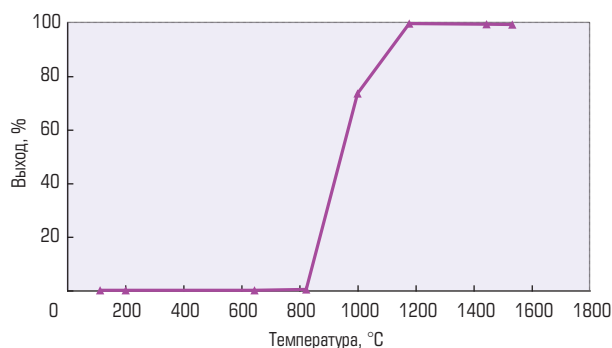


Рис. 1. Влияние температуры сжигания угля 1 на выход золота в газообразную фазу (α = 1,2; P = 0,1 МПа; 1,5 г/т Au; 9 г/т Ag)

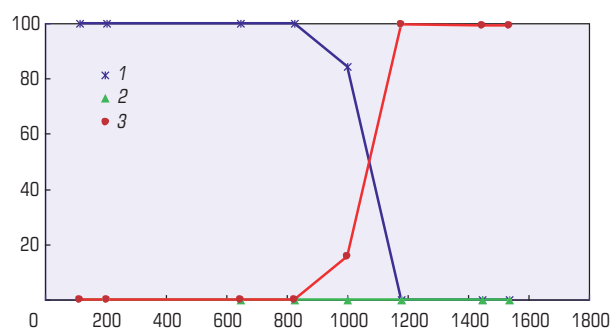


Рис. 2. Влияние температуры сжигания угля 2 на выход золота в газообразную фазу при содержании Au – 7 г/т и Ag – 46 г/т: 1 – Au; 2 – AuH(g) и AuO(g); 3 – Au(g)

полной конденсации газообразных соединений золота с получением элементного металла.

Несколько сложнее поведение соединений серебра. В интервале температур сжигания 820–1534 °С серебро количественно переходит в газовую фазу в виде оксида серебра (AgO(g)). При температуре менее 1179 °С серебро находится в виде металлического. При более высоких температурах оно начинает переходить в газообразное состояние преимущественно в виде Ag(g), количество которого увеличивается с ростом температуры и при 1534 °С составляет 41,28 %. Переход серебра в газообразные соединения оксида (AgO(g)) и гидрида (AgH(g)) серебра незначителен. Из других рассмотренных ЦЭ газообразные соединения при сжигании бурого угля может образовывать селен, который при температурах сжигания от 824 до 1000 °С переходит в газовую фазу на 94–99 %.

Соединения большинства рассмотренных микроэлементов, образующиеся при газификации или сжигании бурого угля, существенно отличаются. Так, газификация бурого угля с высоким содержанием соединений кальция, в отличие от его сжигания [1, 7], практически не сопровождается образованием газообразных соединений золота. В интервале температур 114–1534 °С выход Au(g) составляет ~0,6 %.

Термодинамическое моделирование подтверждает результаты экспериментальных исследований и результаты работ в промышленных условиях об образовании при сжигании угля газобразных соединений германия, количество которых увеличивается при $t \geq 1200$ °С, а также их практически полной конденсации при $t \leq 600$ °С [1].

Следовательно, для извлечения золота из углей в процессе их сжигания необходимо его улавливание из дымовых выбросов. При этом сжигание угля целесообразно проводить в условиях максимального выхода шлаковой фазы, который характерен для процесса в слоевой топке, с минимальным недожогом угля.

Основным условием целесообразности разработки технологии извлечения золота из углей следует считать такое его содержание, которое обеспечит получение из отходов сжигания экономически обоснованного золотоносного продукта. При этом оценки средних содержаний золота и серебра в углях, полученные различными авторами, изменяются в широких пределах и в основном занижены. Это объясняется трудностями получения представительных проб для анализа, обеспечения достаточной точности и чувствительности для непосредственного количественного определения золота.

Рассматривая вопрос извлечения золота из отходов сжигания углей, следует отметить, что их содержание в исходном угле одного и того же месторождения колеблется в очень широких пределах [8]. Считается, что без особой подготовки проб к проведению анализа нельзя получить надежных результатов. В Амурском научном центре ДВО РАН разработан метод пробирного анализа, который обеспечивает сохранность летучих форм золота в анализируемой пробе угля [9]. С его помощью были выявлены на 1–2 порядка бóльшие значения золота более чем в 3500 проб углей. С помощью нейтронно-активационного анализа было определено содержание золота в золе угля Павловского месторождения, которое составляет от 3 до 50 г/т золы.

В ИПКОН РАН с участием автора статьи разработана методика микроволнового нагрева с кислотами пробы угля под давлением (220 °С; 2,5 МПа) в системе MarsXpress (со сбросом избыточного давления), которая позволяет получать подтвержденные данные о содержании золота в угле [10]. Следует отметить, что во всех случаях на результаты влияет представительность взятой навески.

Многочисленными исследованиями установлено, что угли могут служить источником промышленной добычи золота, содержание которого по отдельным регионам залегания (Приморье, КАБ, Кузбасс и др.) составляет от одного до нескольких граммов на 1 т. Повышенным содержанием золота, как правило, отличаются бурые энергетические угли [1, 3, 5]. Установлено, что золото в бурых углях Дальнего Востока представлено минеральными частицами самородного высокопробного металла в виде микро- и наночастиц и твердыми растворами Au–Ag, Au–Ag–Cu и Au–Cu(Ni, Zn) [6].

В связи с присутствием такого золота извлекать его из углей традиционными методами технологически нецелесообразно и экономически невыгодно. Использование прямого цианирования, особенно из бурых углей, осложнено взаимодействием угля со

щелочным раствором и активной сорбцией углем образовавшегося цианистого комплекса.

Для проверки и уточнения информации о содержаниях золота в углях и разработки способа его извлечения по заказу и с участием АО «Сибирская угольная энергетическая компания» (АО «СУЭК») сотрудниками ИПКОН РАН и коллективом сотрудников АмурНЦ ДВО РАН под руководством чл.-корр. РАН А. П. Сорокина и канд. техн. наук В. М. Кузьминых была проведена совместная работа по изучению золотоносности и разработке технологических основ процесса извлечения золота из бурых углей Назаровского и Бородинского месторождений КАБ.

На Назаровском и Бородинском месторождениях был проведен систематический отбор проб и изучен их химический состав, который показал высокую степень неоднородности распределения золота по месторождению. Всего по месторождениям отобрано 67 секционных (бороздовых) и 93 точечных пробы.

Бурые угли и вмещающие породы анализировали в твердой и жидкой фазах основными аналитическими методами, включая пробирный. Учитывая неоднозначность результатов, получаемых на практике различными методами анализа, при определении спектра элементов в пробах проводили параллельный анализ с помощью различных методов: масс-спектрометрического с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), атомно-абсорбционного с индуктивно связанной плазмой (ИСП-ААС), атомно-абсорбционного анализа (ААА) и рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). Учитывая, что, например, атомно-абсорбционный анализ значительно занижает результат по золоту, для его точного определения применяли усовершенствованный метод пробирного анализа [9].

В результате исследований выявлены наиболее обогащенные золотом горизонты в пластах Мощный (Назаровское месторождение) и Бородинский 1 (Бородинское месторождение). В пласте Мощный, имеющем основную промышленную ценность, рядовые концентрации металла колеблются от 0,82 до 9,91 г/т и выделяются два обогащенных горизонта с содержанием 4,85 и 4,61 г/т золота (**рис. 3**). Бородинское месторождение опробовано по пяти пластам. Содержание металла по пластам колеблется в широких пределах: от следов до 13,6 г/т. Основные концентрации размещены в интервале 1–5 г/т (более 50 %), а в пласте Бородинский-1 установлены два горизонта с повышенными концентрациями металла: 9,19 и 2,95 г/т.

Проведены электронно-микроскопические и рентгеноспектральные исследования минеральных форм золота, платиноидов и минеральных ассоциаций. Многокомпонентный минералогический анализ отобранных проб углей КАБ показывает, что они характеризуются повышенными концентрациями Ni, Cd, Ag, Pb, Sr и частично Mn, Cu и V. В целом для благородных металлов установлена высокая степень неоднородности их распределения. Угли пласта Мощный Назаровского месторождения характеризуются повышенным количеством серосодержащих минералов — сульфидов (преимущественно пирит) и сульфатов. Благородные металлы представлены минералами золота и серебра и представляют собой твердые растворы с медью и цинком различного состава. Угли пластов Бородинский-1 и Бородинский-2 характе-

ризируются повышенным количеством силикатных минералов. Золото также присутствует в виде твердых растворов Au–Cu–Zn, Au–Cu–Ag, Au–Cu–Zn–Pb, содержащих более 80 % Au. Серебро представлено самородной формой, сульфидами и хлоридами.

Учитывая, что золото в углях присутствует в форме микро- и наночастиц, а также в виде твердых растворов, работа была направлена на попутное извлечение золота при сжигании угля в печи слоевого сжигания.

Методика эксперимента заключалась в получении золотосодержащего конденсата, образующегося при охлаждении дымовых выбросов из печи сжигания угля. Учитывая распределение золота в продуктах горения угля, в лабораторных условиях были испытаны различные способы улавливания золота из дымов. Наилучшие результаты по улавливанию достигнуты с помощью конденсации водяного пара в смеси с дымом, при которой происходит переход из газа в водную фазу летучих соединений металлов. Многочисленные эксперименты, проведенные на бурых углях указанных месторождений, показали, что при сжигании угля в дым переходит около 90 % золота. Этот процесс был положен в основу разрабатываемой технологии улавливания золота из дымов от сжигания бурых углей.

Во всех случаях проводили элементный анализ растворов конденсата методом ICP-MS с ионизацией в индуктивно связанной плазме. Анализ конденсатов, содержащих 0,1–0,3 мг/л Au, предусматривал концентрирование золота на сорбенте с последующим проведением пробирной плавки сорбента. Кроме золота, в конденсате преобладает кальций и содержится железо; в гораздо меньших количествах – калий, марганец, бор, магний, алюминий, фосфор и др. (всего определено 57 элементов). Конденсаты, кроме неорганических веществ, аккумулируют в себе и органические соединения. При этом были испытаны два способа очистки конденсата от органических примесей (химический и механический на различных фильтрах). Из возможных вариантов очистки наиболее перспективной оказалась двухстадийная очистка с применением ультрафильтрации.

В экспериментальных условиях на лабораторной установке сжигания углей и улавливания золота из дымов было достигнуто извлечение золота из углей в среднем около 40 %. На опытной установке ожидается более высокое извлечение вследствие возможности создания эффективных условий конденсации.

Разрабатываемая технология была положена в основу проектирования опытной установки на базе котельной со слоевой топкой по извлечению золота из дымовых газов производительностью 500 м³/ч. Разработана опытная технология и проектно-конструкторская документация, на основе которой изготовлена опытная установка, которая включает в себя узел газодинамического передела с конденсацией дымовых выбросов острым паром, узлы очистки конденсата на фильтре, сорбции золота на активированном угле и десорбции металла [11].

Одновременно разрабатываются другие варианты оформления технологического процесса. В ИПКОН РАН исследования направлены на разработку процесса твердофазной конденсации благородных металлов зольными частицами на рукавном фильтре [12].

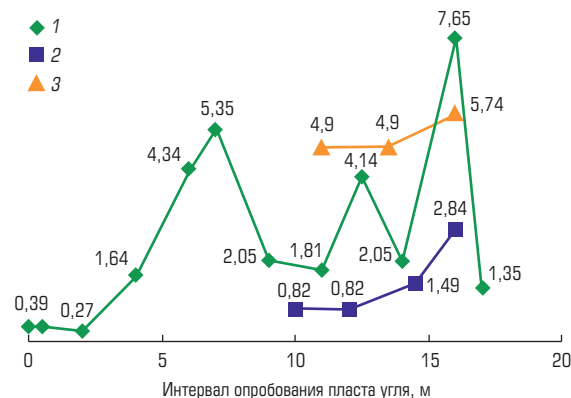


Рис. 3. Содержание золота (г/т) по глубине пласта угля Назаровского месторождения:

1 – интервал опробования 0–18,6 м, в том числе пласта угля 2,2–18 м (15,8 м); 2 – интервал опробования пласта угля 10–16 м – нижняя часть угольного пласта; 3 – интервал опробования пласта угля 11–16 м – нижняя часть угольного пласта

Способ позволяет избежать высокочрезвычайно затратной по расходу воды операции жидкофазной конденсации золота. Разрабатываемая технология отличается меньшими эксплуатационными затратами и основана на контроле температуры и газодинамического режима сжигания углей, что позволяет в условиях слоевой топki получать золу уноса, обогащенную благородным металлом в 5–8 раз в результате конденсации на ней газообразного золота.

Большинство крупных ГРЭС, в том числе АО «Назаровская ГРЭС», улавливание золы осуществляют на электрофильтрах после пылеугольного сжигания. В этом случае концентрирование металлов происходит в меньшей степени, чем при слоевом сжигании с большим выходом шлака. Однако целесообразность извлечения благородных металлов из обогащенной золы очевидна. Следует отметить, что в связи с нарушением кинетических характеристик горения и газодинамических условий процесса в промышленных условиях наблюдается концентрирование части благородных металлов в шлаках.

Были проведены исследования выщелачивания золота из золы и шлака. Выщелачивание золота и других ценных элементов из золы уноса сжигания бурых углей КАБ осуществляли с предварительным удалением щелочных элементов с применением серной и соляной кислот. Установлено, что более высокое содержание золота в растворе (0,27 мг/л) достигается при тиокарбамидном выщелачивании с использованием солянокислого раствора по сравнению с серноокислым (0,17 мг/л).

При выщелачивании шлака в солянокислой среде его измельчение до крупности 71 мкм позволяет в аналогичных условиях достичь содержания золота в растворе 0,21 мг/л, что сопоставимо с его содержанием в растворах конденсатов, а также полученным при выщелачивании золы, несмотря на более неблагоприятный состав и высокое содержание кальция в пробе шлака (28,1 %).

Было исследовано флотационное выделение несгоревшего угля из ЗШО с использованием тонкодисперсных пузырьков [13].

При флотации недожога из измельченного шлака с содержанием углерода 15–18 % в щелочной среде при Т:Ж = 1:5 с использованием водной эмульсии керосина в качестве собирателя (2000 г/т) и МИБК в качестве пенообразователя (50 г/т) извлечение углеродной части составило почти 80 %. При сернокислотной (80 г/л) обработке концентрата флотации в раствор переходят РЗЭ в количестве 17,2 мг/л, в том числе, мг/л: 0,4 La; 0,8 Ce; 0,4 Y; 0,3 Hf; 13,6 Zr. Это указывает на целесообразность извлечения РЗЭ, получению которых из золы уноса уделяется большое внимание в зарубежной практике [14].

Последующее селективное выщелачивание золота из углеродного концентрата, в котором содержалось 0,13 г/т Au, раствором комплексобразователя на основе фосфинатов (Т:Ж = 1:8, время выщелачивания – 1 ч) приводит к снижению содержания в нем золота до уровня 0,02 г/т, т. е. извлечению 84 % Au. Полученный углеродсодержащий продукт после выщелачивания золота может быть направлен на сжигание с целью получения энергоресурсов. Определены реагентные режимы этих операций и параметры обезвоживания кека выщелачивания фильтрованием под вакуумом.

Последующее извлечение золота из тиокарбамидных растворов с относительно невысокой концентрацией благородных металлов может быть осуществлено методом сорбции на активированных углях (СКТ, ОУ, КАД и др.).

Заключение

С применением метода термодинамического расчета установлен фазовый переход золота при термообработке угля в газообразное состояние при температуре 1000–1200 °С и обоснована целесообразность его попутного извлечения из дымовых выбросов в процессе сжигания углей в слоевых топках в условиях максимального выхода шлаковой фазы.

На Назаровском и Бородинском месторождениях КАБ проведен систематический отбор проб и изучен их химический состав,

который показал высокую степень неоднородности распределения золота по месторождению, его промышленное содержание и целесообразность извлечения золота из продуктов сжигания углей.

Разработана опытная технология и создана установка извлечения золота и других ценных элементов жидкофазной конденсацией газообразных соединений из дымовых выбросов острым паром с последующей очисткой растворов и сорбцией золота на активированном угле.

Разработан способ твердофазной конденсации благородных металлов зольными частицами на рукавном фильтре. Предлагаемая технология основана на контроле температуры и газодинамических условий сжигания углей, что позволяет в условиях слоевой топki получать золу уноса, обогащенную благородным металлом в 5–8 раз в результате конденсации на ней газообразного золота.

Разработаны режимы двухстадийного выщелачивания обогащенных ценными элементами отходов сжигания углей, оптимизированные по концентрациям реагентов (тиокарбамида, кислоты), соотношению твердой и жидкой фаз, скорости перемешивания и времени обработки, позволяющие получить продуктивные растворы золота и редких элементов, которые направляются на концентрирование и выделение ценных элементов известными способами. Предложен вариант предварительной флотации неогоревшей части углей с выделением из него ценных элементов и получением углеродного продукта для энергетических целей, что позволит повысить полноту извлечения ценных элементов.

В результате реализации предложенных технологий будет одновременно предотвращен выброс большого количества вредных и опасных веществ в окружающую среду.

Библиографический список

См. англ. блок. [73](#)

«GORNYI ZHURNAL», 2017, № 11, pp. 84–89
DOI: 10.17580/gzh.2017.11.15

Recovery of gold and other high-valued elements from coal and coal combustion products

Information about author

A. A. Lavrinenko¹, Head of Laboratory, Doctor of Engineering Sciences, lavrin_a@mail.ru

¹ Institute of Integrated Mineral Development – IPKON, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

The article describes the main issues connected with the recovery of gold and other high-valued elements from coal and coal combustion products as well as with the ash and slug reclamation. The thermodynamic modeling shows the variation of phase transformations in gold compounds depending on coal combustion temperature and on gold content of original coal. The boundary zone of gold transformation between solid and gaseous phases and backward is presented. It is described how silver compounds behave under thermal treatment of coal. Nonuniformity of gold distribution in coal fields is shown. After the systematic sampling at Nazarovskoe and Borodinskoe deposits, the elemental compositions of the samples are analyzed. Gold content of coal is determined at different depths at Nazarovskoe and Borodinskoe deposits in the Kansk–Achinsk Basin, and the gold-richest levels are identified.

The process of the recovery of precious metals and other high-valued elements from coal and coal combustion products is justified and developed. The argumentation is provided for the method of gold by-production from smoke emission during coal combustion in grate-fired furnaces at the maximum yield of slug. A pilot installation based on a boiler plant with the grate-fired furnace for the gold recovery from smoke emission at a capacity of 500 m³/h is presented.

Thiocarbamide leaching of gold and other high-valued elements from fly ash taken from electrical filters

and from ground slag after lignite combustion with pre-removal of alkaline elements by sulfuric and chlorhydric acids has been carried out. The scope of the studies encompasses flotation of underburning with water-kerosene emulsion used as a collecting agent and with methyl-isobutyl carbinol (MIBC) as a frother, later-on leaching of the flotation concentrate using a complexing agent based on phosphinates, and the influence of difference factors on the efficiency of leaching and recovery of unburnt coal containing high-valued elements.

Keywords: coal, gold, ash, slug, gold entrapment from smoke, gold-bearing condensate, solid state condensation, leaching, rare earth elements, elemental composition, thiocarbamide.

References

1. Shpirt M. Ya., Artemev V. B., Silyutin S. A. Usage of solid wastes of coal mining and processing. Moscow: Gornoe delo OOO "Kimmeriyskiy tsentr", 2013. 432 p.
2. Blissett R. S., Rowson N. A. A review of the multicomponent utilisation of coal fly ash. *Fuel*. 2012. Vol. 97. pp. 1–23.
3. Yao Z. T., Ji X. S., Sarker P. K. et al. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*. 2015. Vol. 141. pp. 105–121.
4. Delitsyn L. M., Vlasov A. S., Melent'ev G. B. et al. Coal ash – wastes or raw materials? *Redkie zemli*. 2015. No. 2(5). pp. 126–135.
5. Shpirt M. Ya., Kler V. R., Pertsikov I. Z. Inorganic components of solid fuels. Moscow: Khimiya. 1990. 240 p.
6. Rozhdestvina V. I., Sorokin A. P., Kuzminykh V. M. Emission of mineral particles of valuable components during the coal burning. *Solid fuel burning: collection of reports of the VIII All-Russian conference with international participation*. Novosibirsk: Izdatelstvo Instituta teplofiziki SO RAN, 2012. pp. 85.1–85.8.

7. Shpirt M. Ya., Lavrinenko A. A., Kuznetsova I. N., Gyulmaliev A. M. Thermodynamic evaluation of the compounds of gold, silver, and other trace elements formed upon the combustion of brown coal. *Solid Fuel Chemistry*. 2013. Vol. 47, No. 5. pp. 263–269.
8. Sorokin A. P., Kuzminykh V. M., Chanturiya V. A. et al. Science-intensive technologies of complex use of mineral resources of Priamurie. *Russkiy inzhener*. 2013. No. 2(37). pp. 18–26.
9. Kuzminykh V. M., Chursina L. A. Gold content determination in gold-containing raw material. Patent RF, No. 2245931. Applied: 01.10.2003. Published: 10.02.2005. Bulletin No. 4.
10. Podgaetskiy A. V., Novikova N. G., Bedretinova E. A., Lavrinenko A. A. Determination of noble metal concentrations in brown coals from the Nazarovskoe deposit using a set of spectrometric methods. *Khimiya tverdogo topliva*. 2014. No. 5. pp. 35–41.
11. Kuzminykh V. M., Sorokin A. P., Lebedev A. N., Podbereznyy V. L., Kurbatov P. R. Unit for gold extraction from fume. Patent RF, No. 93803. Applied: 20.07.2009. Published: 10.05.2010. Bulletin No. 13.
12. Shpirt M. Ya., Lavrinenko A. A., Ruban A. D., Rashevskiy V. V., Artemev B. V. Extraction method of gold from gold-bearing natural raw material. Patent RF, No. 2471008. Applied: 09.12.2010. Published: 27.12.2012. Bulletin No. 3 6.
13. Cao Y. J., Li G. S., Liu J. T. et al. Removal of unburned carbon from fly ash using a cyclonic-static microbubble flotation column. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2012. Vol. 112, Iss. 10. pp. 891–896.
14. Hower J. C., Groppo J. G., Joshi P., Dai S., Moecher D. P., Johnston M. N. Location of Cerium in Coal-combustion Fly Ashes: Implications for Recovery of Lanthanides. *Coal Combustion & Gasification Products*. 2013. Vol. 5. pp. 73–78.

УДК 622.765.061

НОВЫЕ ФЛОТАЦИОННЫЕ РЕАГЕНТЫ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ УПОРНЫХ РУД*



Т. Н. МАТВЕЕВА,
зав. отделом,
д-р техн. наук,
tmatveyeva@mail.ru



Т. А. ИВАНОВА,
старший научный
сотрудник,
канд. техн. наук



В. В. ГЕТМАН,
старший научный сотрудник,
канд. техн. наук



Н. К. ГРОМОВА,
научный сотрудник

Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия

Введение

В последние годы как в России, так и за рубежом в переработку вовлекаются труднообогатимые руды сложного состава с низким содержанием и эмульсионной вкрапленностью золота, платины и других благородных металлов [1–5]. Минералы благородных металлов в упорных рудах отличаются малыми размерами и слабой раскрываемостью, степень измельчения достигает 85 % класса –0,04 мм, что сопровождается образованием большого количества шламов, являющихся источником потерь (до 15–20 %) ценных компонентов при флотации. Несмотря на определенные достижения в области создания новых эффективных

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по разработке и апробации новых классов комплексообразующих реагентов – собирателей и модификаторов для флотационного извлечения благородных металлов из упорных золото- и платиносодержащих руд. Укрупненные лабораторные испытания новых реагентов – термоморфных полимеров с функциональными группами на золото показали, что их применение совместно с бутиловым ксантогенатом обеспечивает повышение качества концентратов по содержанию золота в 1,5–1,7 раза и повышение извлечения на 1,5–5 %.

Ключевые слова: упорные золото- и платиносодержащие руды, флотация, флотационные реагенты, модифицированный дитиокарбамат, дитиофосфинат, дитиазин, растительные модификаторы, адсорбция, комплексообразование, извлечение золота и платины.

DOI: 10.17580/gzh.2017.11.16

реагентов для флотации золотосодержащих и комплексных руд [6–8], отечественная промышленность испытывает дефицит собственной продукции. Большинство импортных реагентов-собирателей не находят практического применения на предприятиях России вследствие их высокой стоимости или повышенной токсичности, а отечественные разработки не доходят до промышленной реализации, в том числе из-за отсутствия технической базы для производства флотореагентов.

Актуальность разработки и создания новых эффективных отечественных реагентов состоит в возможности более полного извлечения золота, платины и других благородных металлов в концентраты при сокращении их потерь с отвальными продуктами обогащения.

В Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН (ИПКОН РАН) в рамках ведущей научной школы академика В. А. Чантурия по физико-химическим методам глубокой переработки природного и техногенного сырья, поддержанной грантами Президента РФ, выполнен комплекс

* Работа выполнена в рамках гранта «Научная школа академика В. А. Чантурия» № НШ-3184.2010.5; НШ-220.2012.5; НШ-748.2014.5.