УДК 622.775

С.Б.ТАТАУРОВ, *канд. техн. наук, доцент, tataurovsb@mail.ru*
Министерство образования и науки Российской Федерации

S.B.TATAUROV, *PhD in eng. sc., associate professor, tataurovsb@mail.ru*
Ministry of Education and Science of the Russian Federation

ОБОСНОВАНИЕ ГЕОТЕХНОЛОГИИ КУЧНОГО КРИОВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА

На основе теоретических и экспериментальных исследований физических, водно-физических и физико-химических свойств сернокислотно-хлоридного раствора в присутствии диоксида марганца в широком диапазоне отрицательных температур обоснована геотехнология кучного криовыщелачивания золотосодержащих руд. Данная геотехнология позволяет проводить круглогодичное кучное выщелачивание золота в условиях криолитозоны путем управления концентрацией электролита-криопротектора – серной кислоты.

Ключевые слова: криовыщелачивание, криопротекторы, сернокислотно-хлоридное выщелачивание, золотосодержащие руды, криолитозона.

JUSTIFICATION OF GOLD HEAP CRYOLEACHING GEOTECHNOLOGY

A heap cryoleaching technology for gold ores was justified basing on theoretical and experimental research into physical, hydrophysical and physiochemical properties of sulfuric-chloride solution in the presence of manganese dioxide within a wide range of negative temperatures. This geotechnology enables year-round heap leaching of gold in conditions of the permafrost zone through controlling concentration of the electrolyte-cryoprotective agent – sulphuric acid.

Key words: cryoleaching, cryoprotective agents, sulfuric-chloride leaching, gold ores, permafrost zone.

На территории распространения многолетнемерзлых горных пород Земли расположены крупнейшие в мире запасы минерального сырья. Значительная часть этих запасов сосредоточена на территории криолитозоны России. Растущая потребность в минеральных ресурсах, связанная с развитием наукоемких технологий, и экологические требования, предъявляемые к освоению территорий распространения многолетнемерзлых горных пород, требует совершенствования и создания ресурсосберегающих малоотходных и экологически безопасных технологий добычи полезных ископаемых.

Начиная с середины XX в., российскими и зарубежными учеными уделяется большое внимание развитию технологий кучного выщелачивания цветных и благородных металлов на территории криолитозоны. Эти технологии базируются на работах М.И.Агошкова, Н.П.Лаверова, В.А.Чантурия, К.Н.Трубецкого, В.Ж.Аренса, П.М.Соложенкина, Д.Р.Каплунова, Д.П.Лобанова, М.Д.Новопашина, А.Б.Птицына, Г.В.Седельниковой, Н.Г.Малухина, Г.Х.Хчеяна, М.И.Фазлуллина, В.П.Неберы, А.Е.Воробьева, В.В.Лодейщикова и др.

В тоже время применение геотехнологий кучного выщелачивания цветных и благородных металлов в криолитозоне сопровождается значительными энергетическими затратами на сохранение температурного режима минерального сырья при рудоподготовке и извлечении ценных компонентов. Высокие цены на энергоносители снижают экономическую эффективность внедряемых

технологий. Кроме того, даже незначительные сбои теплового режима приводят к нарушению всего технологического процесса, а в некоторых случаях к остановке работы предприятий.

Решением этих проблем может являться разработка новых геотехнологий, основанных на нетрадиционных видах энергии и физико-химических преобразованиях вещества в условиях отрицательных температур или в области знакопеременных температурных полей. Причем в основе этих исследований должно быть изучение параметрических характеристик физических и физико-химических процессов, влияющих на эффективность извлечения полезных ископаемых.

В настоящее время одним из перспективных, экологически безопасных, высокоэффективных способов кучного выщелачивания золота является сернокислотно-хлоридное выщелачивание в присутствии диоксида марганца [2]. Этот метод позволяет значительно сократить время кучного выщелачивания (КВ) золота и вовлечь в переработку методом КВ упорные малосульфидные и сульфидные золотосодержащие руды. Разработка и развитие этого способа при добыче золотосодержащих руд в России и ближнем зарубежье стали возможным благодаря работам М.И.Фазлуллина и др. Тем не менее, все возможности данного способа до конца не изучены. В частности, отсутствуют исследования по использованию сернокислотно-хлоридного выщелачивания в присутствии диоксида марганца для круглогодичного кучного выщелачивания золота при отрицательных температурах рудного штабеля и выщелачивающих растворов.

С помощью известных методов исследований и модификации их под поставленные задачи, нами были выполнены теоретические и экспериментальные работы по изучению влияния физических, водно-физических и физико-химических свойств сернокислотно-хлоридного раствора в присутствии диоксида марганца в широком диапазоне отрицательных температур для обоснования геотехнологии кучного криовыщелачивания золотосодержащих руд.

Методика исследований включала расчет на ЭВМ параметров физических и водно-физических свойств водных растворов серной кислоты при отрицательных и положительных температурах, а также проведение экспериментов по криовыщелачиванию золота из золотосодержащих руд в искусственно приготовленных смесях с применением сернокислотно-хлоридных растворов в присутствии диоксида марганца. Содержание золота в искусственных смесях из кварцевого мелкого песка составляло 3 г/кг. В качестве заполнителя использовались золото крупностью < 0,2 мм. Гранулометрический состав искусственной смеси был следующий: –1 +0,5 (2,3 %); –0,5 +0,25 (26,2 %); –0,25 +0,1 (54,8 %); –0,1 (16,7 %).

Исследование коэффициента фильтрации K_1 и степени извлечения золота проводилось на приборе КФ-1 (ГОСТ 25584-83). Измерение температуры по глубине трубки осуществлялось при помощи температурных датчиков МКМТ-16 ИМЗ СО РАН с точностью измерения 0,01 °С и с инерционностью 10 с, закрепленных на щупах толщиной 1,5 мм из текстолита и покрытых сверху несколькими слоями химически устойчивого клея.

В качестве выщелачивающего раствора использовался сернокислотно-хлоридный раствор (до 30 % весового содержания H_2SO_4) в присутствии диоксида марганца. Расход растворителя при каждом опыте составлял 190 мл.

Исходные растворы и растворы после выщелачивания золота анализировались на *Eh* на приборе CG-837 и *pH* на приборе «Анион 7000». Установление концентрации золота в растворах было выполнено на атомно-абсорбционном спектрофотометре фирмы «Perkinelmer» – 303ОВ в режиме абсорбции.

Физические свойства водных растворов электролитов во многом определяют эффективность выщелачивания полезных компонентов в диапазоне положительных и отрицательных температур. Между физическими свойствами выщелачивающих растворов и коэффициентом фильтрации существует следующая связь:

$$K_1 = K_2 \frac{\rho}{\eta}, \qquad (1)$$

где K_1 коэффициент фильтрации, м/сут; K_2 – коэффициент проницаемости грунтов, Д; ρ – плотность воды, кг/м^3; η – вязкость воды, Па·с.

Согласно этому уравнению при использовании водных растворов электролитов при положительных и отрицательных температурах на коэффициент фильтрации будут оказывать влияние изменение плотности и динамической вязкости растворов. В качестве примера приведены результаты регрессионного анализа на ЭВМ, измерений плотности и динамической вязкости для водного раствора, содержащего электролит-криопротектор – серную кислоту с весовым содержанием 30 %:

Параметр	A	b	$b1$	R
$\rho = a + bt$, кг/м^3	1232	−0,68		0,99
$\eta = a + be^{(-t/b1)}$, Па·с	0,52	3,18	28,43	0,99
	−0,05	0,72	39,13	0,99

Примечание. a; b; $b1$ – коэффициенты аппроксимации уравнений; R – коэффициент детерминации; t – температура песчаного материала, °С.

Справочные данные для регрессионного анализа на ЭВМ плотности и динамической вязкости водного раствора с 30 %-ным весовым содержанием серной кислоты заимствованы из работ [4, 5].

Полученные зависимости плотности и динамической вязкости водного раствора серной кислоты от изменения температуры в диапазоне от –30 до +30 °С свидетельствуют, что изменение динамической вязкости из области положительных температур в область отрицательных значений происходит плавно и с увеличением на всем интервале температур по экспоненциальному закону (рис.1, кривая 1), для плотности в данном диапазоне температур характерна линейная зависимость (рис.1, кривая 2).

Расчетная ошибка по формулам регрессионного анализа при определении динамической вязкости водного раствора серной кислоты на всем интервале изменения температур (от +30 до –30 °С) составила не более 3 % для плотности не более 2 %, что позволяет использовать эту методику для технологических расчетов.

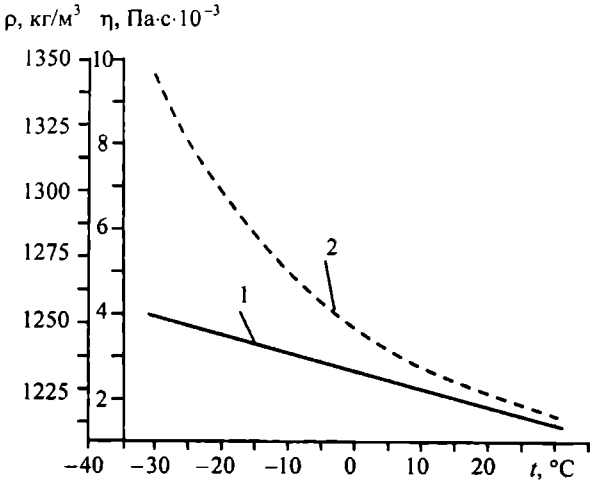


Рис.1. Зависимость изменения плотности (1) и динамической вязкости (2) водного раствора серной кислоты в диапазоне положительных и отрицательных температур

В результате проведенного многофакторного моделирования процессов фильтрации на ЭВМ и экспериментальных исследований по имеющимся значениям плотности ρ и динамической вязкости η выщелачивающих растворов установлено, что при весовом содержании серной кислоты 30 % и понижении температуры из области положительных значений в область отрицательных для монодисперсной системы с пористостью 45 % наблюдается снижение коэффициента фильтрации от 3,9 до 0,6 м/сут, тогда как для монодисперсной системы с пористостью 40 % и ниже коэффициент фильтрации изменяется от 2,5 до 0,1 м/сут.

Для монодисперсной системы с пористостью ниже 26 % коэффициент фильтрации 30 %-ного выщелачивающего раствора электролита, содержащего криопротектор – серную кислоту, находится ниже предела допустимых значений коэффициента фильтрации при кучном выщелачивании.

При охлаждении водного раствора с весовым содержанием серной кислоты 10 % ниже температуры замерзания –5,5 °С наблюдалось выпадение кристаллогидратов с уменьшением объема выщелачивающей жидкости и увеличение ее концентрации. Механизм, динамика и закономерности процесса

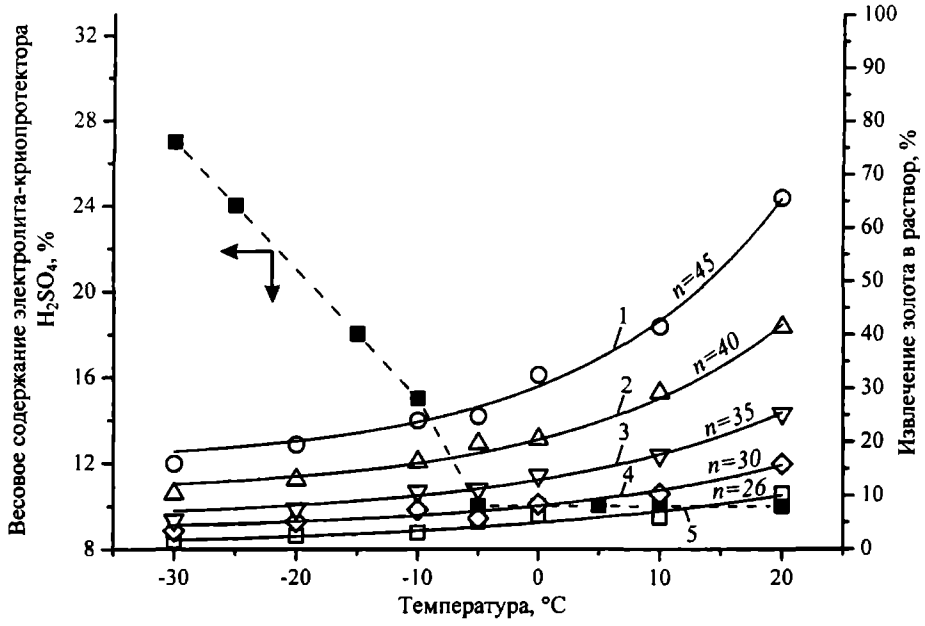


Рис.2. Расчетные и экспериментальные зависимости степени извлечения золота в раствор от изменения концентрации электролита-криопротектора и пористости монодисперсной системы (45, 40, 35, 30 и 26 %) в диапазоне отрицательных и положительных температур при прочих равных условиях

криогенного концентрирования водных растворов серной кислоты подробно описана в работах А.Б.Птицына [3].

Наблюдаемый нами эффект будет проявляться при фильтрации охлажденного выщелачивающего водного раствора электролита через морозное минеральное сырье с температурой ниже температуры замерзания раствора. Так, при выщелачивании руды водными растворами электролитов при температуре ниже точки замерзания раствора будет происходить выпадение кристаллогидратов, что приведет к снижению объема и увеличению концентрации криогенного раствора. Образование кристаллогидратов может привести к частичной или полной закупорке пор в песчаной кварцевой смеси, а как следствие, к нарушению технологии выщелачивания до полной остановки работы предприятия. Поэтому при круглогодичном выщелачивании полезных ископаемых водными растворами электролитов в условиях криолитозоны следует четко регламентировать параметрические характеристики выщелачивающих растворов в зависимости от климатических условий территорий.

На основе полученных результатов были выполнены экспериментальные исследования и проведены расчеты по установлению зависимостей извлечения золота в раствор от изменения концентрации электролита-криопротектора в сернокислотно-хлоридном выщелачивающем растворе в присутствии диоксида марганца и пористости среды в диапазоне отрицательных и положительных температур при прямом механизме растворения за единицу времени при прочих равных условиях (рис.2).

В качестве исходных расчетных данных также использовались результаты исследований выщелачивания золота сернокислотно-хлоридным раствором в присутствии гидратированного диоксида марганца при положительных температурах, полученные М.И. Фазлуллиным и др. [2].

Извлечение золота при кучном выщелачивании минерального сырья с применением известного сернокислотно-хлоридного раствора в присутствии диоксида марганца рассчитывается по формуле

$$\varepsilon(T) = k_{\phi} \frac{(CSt_{lea})}{P} \cdot 100\,\%, \qquad (2)$$

где $\varepsilon(T)$ извлечение золота при прямом режиме выщелачивания, %; C – концентрация золота в продуктивном растворе, кг/м^3; t_{lea} – время выщелачивания, сут; S – площадь орошаемой поверхности, м^2; P – средняя масса золота в исходной руде, кг; $k_ф$ – коэффициент фильтрации, м/сут.

Коэффициент фильтрации выщелачивающего раствора с учетом влияния температур рассчитывался по формуле [1]

$$k(T) = d^2 \mathrm{S1} \frac{\rho}{\eta}. \qquad (3)$$

где d – эффективный диаметр частиц, мм; S1 – число Слихтера, безразмерная величина, определяемая коэффициентом упаковки частиц.

На основе установленных закономерностей выщелачивания золота при отрицательных температурах разработан алгоритм и программа расчета параметров изменения физических и водно-физических свойств выщелачивающих растворов, содержащих электролиты-криопротекторы.

Таким образом, нами обоснована возможность применения геотехнологии кучного криовыщелачивания золота с применением сернокислотно-хлоридных растворов в присутствии диоксида марганца при отрицательных температурах штабеля путем регулирования концентрации электролита-криопротектора – серной кислоты. Для его реализации усовершенствована геотехнология сернокислотно-хлоридного выщелачивания золота в присутствии диоксида марганца, включающая криодезинтеграцию руды, выщелачивание руды с комбинированием кюветного и кучного выщелачивания золота [2].

Геотехнология кучного сернокислотно-хлоридного криовыщелачивания сульфидных золотосодержащих крепких руд в присутствии диоксида марганца включает следующие операции: дробление крепких руд до крупности –20 мм, складирование руды в рудные массивы или на площадку выщелачивания, сезонное замораживание-оттаивание (криодезинтеграцию) массива руды (I этап), круглогодичное кюветно-кучное криовыщелачивание, орошение технической водой, сезонное промораживание-оттаивание (криодезинтеграциию) остатков выщелачивания (II этап), проведение повторного кучного выщелачивания остатков с последующей криоконсервацией отвала (рис.3).

Усовершенствованная геотехнология сернокислотно-хлоридного выщелачивания золота в присутствии диоксида марганца предусматривает проведение технологических мероприятий, направленных на повышение извлечение золота из крепких руд, а также всесезонное выщелачивание золота в условиях криолитозоны без применения дополнительных мероприятий по сохранению положительных температур теплового состояния штабеля.

По сравнению с существующей схемой кучного сернокислотно-хлоридного выщелачивания золота модернизированная геотехнология кучного сернокислотно-хлоридного криовыщелачивания золота в присутствии диоксида марганца базируется на установленных зависимостях физических, водно-физических и физико-химических свойствах растворов, содержащих электролиты-криопротекторы, что позволяет проводить выщелачивание золотосодержащих руд при тепловом состоянии штабеля в диапазоне от –30 до +20 °С.

Исследования сернокислотно-хлоридного выщелачивания золота в присутствии диоксида марганца показали, что извлечение золота из руды после I цикла криодезинтеграции в зимний период при температуре штабеля от –30 до 0 °С составляет 21-30 %, в летний период при температуре от 0 до +20 °С – 30-81 %. После II цикла криодезинтеграции хвостов выщелачивания суммарное извлечение золота в зимний период для температуры от –30 до 0 °С составляет 23-34 %, в летний период 0 – +20 °С – 38-87 %.

Круглодогодичный режим работы предприятия обеспечивается технологией рудоподготовки, включающей операции дробления и криодезинтеграции руды в штабеле [6], с последующим круглогодичным кучным выщелачиванием золота при тепловом состоянии штабеля в диапазоне от –30 до +20 °С.

Базовые параметры и режимы кучного сернокислотно-хлоридного криовыщелачи-



Рис.3. Принципиальная геотехнологическая схема кучного сернокислотно-хлоридного криовыщелачивания сульфидных золотосодержащих крепких руд в присутствии диоксида марганца (с применением криодезинтеграции рудного штабеля)

вания сульфидных золотосодержащих крепких руд в присутствии диоксида марганца (с применением криодезинтеграции рудного штабеля):

Наименование параметра	Значения
Производительность установки, тыс.т.	150
Содержание золота в товарной руде, г/т	> 1
Режим работы установки кучного выщелачивания	Круглогодичный
Крупность руды, направляемой на кучное выщелачивание, мм	–20 +0
Тип гидроизоляционного основания под размещение штабеля	Одноразового или многоразового использования
Высота штабеля, м	2,5-5
Общая высота штабеля (при выщелачивании руды в две очереди), м	5-10
Продолжительность полного цикла выщелачивания при тепловом состоянии штабеля от –30 до +20 °С, сут	45-75
Рекомендуемая схема подготовки руды	Двухстадиальное дробление
Извлечение золота из руды, %	
После I цикла криодезинтеграции (увлажненная руда):	
в зимний период для –30 – 0 °С	21-30
в летний период для 0 – +20 °С	30-81
После II цикла криодезинтеграции хвостов выщелачивания:	
в зимний период для –30 – 0 °С	23-34
в летний период для 0 – +20 °С	38-87
Суммарное извлечение золота из руды, %	
После I цикла криодезинтеграции (увлажненная руда)	83-89
После II цикла криодезинтеграции хвостов выщелачивания (увлажненная руда)	87-96
Ориентировочный суммарный расход реагентов на 1 т руды, кг	
Серная кислота (92,5 % H_2SO_4)	105-270
в зимний период для –30 – 0 °С	95-105
в летний период для 0 – +20 °С	20-65
Пиролюзит (MnO_2)	280-630
Хлорид натрия (NaCl)	92-242
Оксид кальция (70 % CaO)	75-110

Выводы

В ходе проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Установлены зависимости основных количественных показателей кучного сернокислотно-хлоридного выщелачивания золота в присутствии диоксида марганца от концентрации криопротектора (серной кислоты), температуры, динамической вязкости, плотности, коэффициента фильтрации раствора и пористости руды в условиях отрицательных температур. Экспериментально доказана возможность кучного выщелачивания золота в диапазоне отрицательных температур рудного штабеля от 0 до –30 °С;

2. Разработанная теория является основой для создания методов расчета кучного криовыщелачивания золотосодержащего сырья природного и техногенного происхождения в условиях криолитозоны, характеризующейся распространением мерзлых горных пород и среднегодовыми отрицательными температурами воздуха:

• экспериментальные зависимости, методы и уравнения определения параметров криодезинтеграции крепких руд, формирования штабелей из окомкованных глинистых золотосодержащих руд рекомендуются для разработки мероприятий по повышению производительности добычи золота и энергосбережения при освоении золотосодержащих месторождений криолитозоны природного и техногенного происхождения;

• установленные зависимости кучного криовыщелачивания золота с применением сернокислотно-хлоридного выщелачивания в присутствии диоксида марганца могут быть использованы при оценке и выборе параметров выщелачивающих растворов, содержащих электролиты-криопротекторы, при освоении месторождений цветных и благородных металлов в условиях распространения многолетнемерзлых горных пород.

3. Предложена геотехнология кучного криовыщелачивания золота с применением сернокислотно-хлоридного раствора золота в присутствии диоксида марганца и установлены базовые параметры и режимы криовыщелачивания сульфидных крепких золотосодержащих руд.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грунтоведение / Под ред. В.Т.Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.

2. Кучное выщелачивание благородных металлов / Под ред. М.И.Фазлуллина. М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. 647 с.

3. *Птицын А.Б.* Геохимические основы геотехнологии металлов в условиях мерзлоты. Новосибирск: Наука, 1992. 120 с.

4. Справочник сернокислотчика / Под ред. проф. К.М.Малина. М.: Химия, 1971. 744 с.

5. Справочник химика / Под ред. чл.-кор. АН СССР Б.П.Никольского. М.-Л.: Химия, 1980. Т.3. 1008 с.

6. *Шестернев Д.М.* Исследование криогенной дезинтеграции золотокварцевых руд для интенсификации процесса кучного выщелачивания золота / Д.М.Шестернев, В.П.Мязин, С.Б.Татауров // Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых. 2006. № 1. С.108-116.

REFERENCES

1. Soil Science / Edited by V.T.Trofimov. Moscow: Publishing House of the Moscow State University, 2005. 1024 p.

2. Heap Leaching of Noble Metals / Edited by M.I.Fazlullin. Moscow: Publishing House of the Academy of Mining Sciences, 2001. 647 p.

3. *Ptitsyn A.B.* Geochemical Basics of Metal Geotechnology in Permafrost Conditions. Novosibirsk: Nauka Publishing House, 1992. 120 p.

4. Reference Book of Sulphuric Acid Engineer / Edited by prof. K.M.Malin. Moscow: Chemistry Publishing House, 1971. 744 p.

5. Reference Book of Chemical Engineer / Edited by Cor. Member of Academy of Sciences of USSR B.P.Nikolskiy. Moscow-Leningrad: Chemistry Publishing House, 1980. V.3. 1008 p.

6. *Shesternev D.M., Myazin V.P., Tataurov S.B.* Studies of Cryogenic Disintegration of Gold-Quartz Ores in order to Enhance Gold Heap Leaching Process // Physical and Engineering Challenges in Mineral Deposit Developing. 2006. N 1. P.108-116.