

УДК 546.59.57

DOI: 10.15372/ChUR2019135

## Извлечение золота и серебра из трудноскрываемого арсено-пиритного гравииоконцентрата

В. К. ВАРЕНЦОВ, В. И. ВАРЕНЦОВА

*Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения РАН,  
Новосибирск (Россия)**E-mail: vvk@ngs.ru*

### Аннотация

Приведены результаты исследований извлечения золота и серебра из трудноскрываемого арсено-пиритного гравииоконцентрата – от механохимического вскрытия концентрата, последующего цианистого выщелачивания, электролитического извлечения металлов из цианистых растворов до получения готовой продукции в виде сплава металлов и оценки оборотного использования цианистых растворов после электролиза в процессе выщелачивания. Электролитическое извлечение золота и серебра осуществляли на катоды из углеродных волокнистых материалов с последующей термической обработкой и получением готовой продукции с суммарным содержанием золота и серебра до 95 мас. %. Результаты последующих промышленных испытаний на золотоизвлекательной фабрике показали, что механохимическое вскрытие и опытно-промышленный активатор, использованные для получения золота и серебра из упорных арсено-пиритных гравииоконцентратов месторождений северо-востока Казахстана, позволили повысить скорость и степень извлечения золота и серебра.

**Ключевые слова:** арсено-пиритный гравииоконцентрат, механохимическая активация, выщелачивание, электроизвлечение, золото, серебро, промышленные испытания, углеродные волокнистые электроды

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросы извлечения золота из упорных концентратов и руд в последние годы привлекают все большее внимание. Предполагается, что значительная часть золота в ближайшие десятилетия будет добываться из упорных руд (пиритных, арсено-пиритных и др.). Для извлечения золота и серебра из таких концентратов разрабатываются различные технологические схемы, использующие индивидуально или в сочетании методы пиро-, гидрометаллургии, автоклавной, бактериальной обработки [1–5]. Перспективным, но не нашедшим широкого применения является метод тонкого измельчения, включающий механохимическую обработку концентратов с последующим растворением золота в цианистом растворе [1–4, 6, 7].

В [8] показано, что процесс растворения золота в цианистых растворах в контакте с суль-

фидными минералами (например, пиритом) значительно усиливается при механохимической активации таких минералов. При этом золото, находящееся в контакте с пиритом, является анодом, пирит – катодом. Пирит – один из основных минералов арсено-пиритных золотосодержащих руд. Растворение золота осуществляется за счет работы короткозамкнутой электрохимической системы (КЭС): золото – пирит – раствор цианистого натрия.

Сложный и существенно отличающийся состав руд различных месторождений не позволяет предсказать поведение золота и серебра на разных стадиях гидрометаллургической технологии. Поэтому необходимо проведение научно-технологических исследований, опытно-промышленных испытаний разрабатываемых процессов – от вскрытия промпродукта конкретного месторождения до получения готового продукта, желательного в виде металла, –

непосредственно на золотодобывающем предприятии.

Очевидно, что совершенствование технологии добычи золота и серебра возможно по пути интенсификации всех стадий технологического процесса извлечения металлов из руды.

В настоящей работе приведены результаты исследований, выполненных на золотодобывающем предприятии, и разработки технологии извлечения золота и серебра из трудновскрываемого арсено-пиритного гравииоконцентрата. Изучаемые процессы состояли из следующих стадий:

- 1) механохимическое вскрытие концентрата;
- 2) цианистое выщелачивание золота и серебра;
- 3) электролитическое извлечение золота и серебра из осветленных растворов на проточные трехмерные электроды из углеродных волокнистых материалов;
- 4) обратное использование растворов в цикле “электролиз – выщелачивание”.

Последующие промышленные испытания процесса и аппаратуры для механохимического вскрытия арсено-пиритного гравииоконцентрата руды Васильковского месторождения проводились на основании результатов этих исследований.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Лабораторные исследования

Механохимическое вскрытие гравииоконцентрата проводили на планетарной центробежной мельнице М-3 при различных условиях измельчения. При выборе условий механохимической активации продукта преследовались следующие цели: 1) достижение высокой активности материала; 2) получение высокой дисперсности материала; 3) обеспечение при выщелачивании золота и серебра минимально возможных концентраций цветных металлов и железа в растворе. Поэтому гравииоконцентрат в планетарной мельнице обрабатывали в различных средах: воздушной, водной, водно-щелочной. При этом варьировались: 1) время активации от 0.5 до 10 мин; 2) среда активации: водная, с содержанием воды от 5 до 40 %, водно-щелочная, с содержанием воды 25 % и оксида кальция до 5 кг/т концентрата.

Цианистое выщелачивание осуществляли в бутылочном агитаторе по режиму, используемому на Васильковской опытной золотодобывающей фабрике (ОЗИФ): концентрация цианида натрия 0.03–0.04 %, оксида кальция 0.03–0.04 %, отношение  $\text{Ж} : \text{T} = 3 : 1$ .

Электролитическое извлечение золота и серебра из осветленных растворов проводили по методике и на установке, описанных в [9, 10]. Электролизер состоял из катодной и двух анодных камер, габаритная поверхность катода 60 см<sup>2</sup>. Электродные пространства разделены ионообменной мембраной МК-40-2Л, аноды – платинированный титан. В качестве катодов использовали углеродные волокнистые материалы (УВМ) марок ВВП-66-95, НТМ-100, НТМ-200, КНМ, ВИНН-250, ВНГ-30, отличающиеся значениями удельной поверхности и удельной электропроводности. Свойства этих материалов приведены в [9, 10].

В процессе электроизвлечения металлов варьировали следующие параметры процесса: а) плотность тока 200–2000 А/м<sup>2</sup>; б) толщина катода из УВМ 2–25 мм; в) скорость потока раствора сквозь объем электрода 2–40 мл/с через 1 см<sup>2</sup> габаритной поверхности электрода. Электролиз проводили в проточном режиме, т. е. при однократном прохождении раствора сквозь объем электрода.

Выщелачивание металлов из концентрата при обратном использовании растворов проводили с корректировкой и без корректировки состава раствора по цианистому натрию и оксиду кальция.

### Промышленные испытания

Промышленные испытания проводили с использованием активатора непрерывного действия Э-УЭМП, спроектированного по техническому заданию авторов статьи и изготовленного в СКБ ГОМ, выполненного по схеме аппарата АМА [11].

Аппаратурная схема активирования концентрата и выщелачивания металлов из концентрата включала агитатор для приготовления пульпы, активатор Э-УЭМП непрерывного действия, агитатор для выщелачивания, насосы для перекачки пульпы. Рабочий объем барабана активатора – 3 л, загрузка шаров 10 мм – 3 кг, скорость вращения барабана – 600 об/мин.

Пульпа с отношением  $\text{Ж} : \text{T} = 2 : 1$  и рН ~ 11 готовилась в смесителе, подавалась в активатор со скоростью 0.1–0.6 м<sup>3</sup>/ч и затем подвергалась цианированию в агитаторе открытого типа с механическим перемешиванием в течение 6 ч при концентрации цианистого натрия 0.1 %, оксида кальция 0.1 % (рН раствора 10.8).

Анализ растворов и золотосодержащих продуктов осуществлялся в пробирно-аналитической лаборатории Васильковского ГОКа согласно ме-

ТАБЛИЦА 1

Рациональный анализ руды Васильковского месторождения

Форма нахождения золота	Содержание, г/т	Распределение, %
Свободное	0.9	27.3
В сростках с арсенопиритом и кварцем	1.3	39.4
В сульфидах	0.5	15.2
В кварце, в породе	0.6	18.6

Примечание. Размер золотин 0.001–0.01 мкм.

тодикам, используемым в золотодобывающей промышленности (пробирный анализ, атомно-абсорбционный анализ, гранулометрический, минералогический и рациональный анализ) [12].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Химический состав гравииоконцентрата: золото 5–50 г/т, серебро 16–20 г/т, медь 0.29–0.4 %, железо 4–9 %, цинк 0.1–0.7 %, свинец 0.17 %, мышьяк 1.6–5.1 %, кварц 55.7 %, сера общая 2.05 %. По данным минералогического анализа, гравииоконцентрат содержит 56 % кварца, 30 % сульфидных минералов пирита и арсенопирита. В табл. 1 приведены результаты рационального анализа руды Васильковского месторождения.

Видно, что руда содержит мелкодисперсное золото, ассоциированное с пиритом и арсенопиритом, относится к трудновскрываемым (упорным) рудам.

Определены условия механохимической обработки концентрата, обеспечивающие лучшее извлечение золота при последующем цианировании: а) в водной среде, содержание воды 30–40 %; б) в водно-щелочной среде, содержание воды 25 %, оксида кальция 2–3 кг/т концентрата. Степень извлечения золота и серебра из механохимически активированного концентрата при цианировании составила 91.0–95.2 и 86.2–93.7 % соответственно, содержание золота в растворе 9.9–11.5, серебра 8.1–9.2 мг/л.

Для сравнения проводили цианирование образцов без их механохимической активации. Для этого использовали образец исходного гравииоконцентрата и образцы гравииоконцентрата, измельченные в шаровой мельнице или виброистирателе, которые содержали 7, 50 и 98 %

частиц соответственно крупностью –0.071 мм. Несмотря на значительное увеличение степени измельчения продукта (от 7 до 98 %), извлечение золота при цианировании возросло всего на 5–6 % и не превысило 63 %, извлечение серебра увеличилось на 2.5 %.

После выщелачивания активированного концентрата электролизу подвергали растворы следующего состава, мг/л: золото 9.9–11.5, серебро 8.1–9.2, медь 20–450, цинк 4–48, железо 0.1–51, растворитель цианистый натрий 0.03–0.01 %, рН 10–12. Лучшие результаты получены с использованием углеродных волокнистых материалов: ВВП-66-95, НТМ-100, ВИНН-250. Эти материалы позволяли извлекать золото из указанных выше растворов на 88–92 % при однократном прохождении раствора сквозь объем электрода, что обеспечивает производительность процесса 50–70 м<sup>3</sup> раствора в сутки на 1 м<sup>2</sup> габаритной поверхности катода в электролизерах типа ЭУ-10В [13, 14]. УВМ с извлеченными металлами подвергали обжигу и плавке. Суммарное содержание золота и серебра в катодном металле составило 90–95 % в зависимости от режима электролиза.

Исследование оборотного использования растворов в цикле “электролиз – выщелачивание” показало, что растворы без корректировки их состава по цианистому натрию и рН могут использоваться без ухудшения показателей процесса выщелачивания не более двух раз, после чего их необходимо подкреплять (корректировать) по содержанию цианистого натрия. Растворы, состав которых корректировали после каждого процесса электролиза, позволяли получать высокую степень извлечения золота в процессе выщелачивания, в ряде случаев превышающую извлечение золота свежим раствором на 2–3 %.

ТАБЛИЦА 2

Гранулометрический состав исходного концентрата

Размер частиц, мм	+1.6	+1.25	+0.8	+0.5	+0.4	+0.125	+0.074	–0.07
Доля фракции, %	1.2	1.2	5.2	10.0	8.0	53.8	13.5	10.2

ТАБЛИЦА 3

Гранулометрический состав активированного гравиконоцентрата

Размер частиц, мм	+0.02	+0.01	+0.005	-0.005
Доля фракции, %	0.6	17.2	62.4	19.2

ТАБЛИЦА 4

Результаты цианистого выщелачивания золота из гравиконоцентрата

Гравиконоцентрат	Извлечение золота в раствор за 6 ч, %
Исходный	67
Активированный при скорости подачи пульпы в активатор, м <sup>3</sup> /ч	
0.11	84
0.18	90
0.40	90

Ниже приведены результаты промышленных испытаний активатора непрерывного действия и технологии механохимической активации гравиконоцентрата. Преимущества механохимической активации видно из результатов гранулометрического состава исходного (табл. 2) и активированного (табл. 3) концентрата. Размер частиц исходного концентрата колеблется в широком интервале (см. табл. 2), что, как известно, существенно затрудняет тонкое измельчение продукта. Механохимическая обработка при активации со скоростью подачи пульпы в активатор 0.4 м<sup>3</sup>/ч позволила получить достаточно однородный продукт (см. табл. 3).

Из приведенных в табл. 4 результатов цианирования исходного и активированного гравиконоцентратов следует, что механохимическая обработка в непрерывном режиме позволила значительно увеличить степень извлечения золота – с 67 до 90 %, при этом в 1.4–1.9 раза увеличилась скорость выщелачивания золота. Это свидетельствует о высокой эффективности разработанного механохимического способа обработки гравиконоцентрата и испытанной конструкции активатора.

Расход электроэнергии на переработку 1 т гравиконоцентрата составил 20–25 кВт·ч, оптимальная скорость протока пульпы 0.2–0.4 м<sup>3</sup>/ч.

Результаты промышленных испытаний послужили основанием промышленного использования технологии и активатора сотрудниками золотоизвлекательной фабрики для переработки трудновскрываемого концентрата одного из месторождений Северного Казахстана. Концентрат содержал золота 65.5 г/т, пирита 70 %, размер золотин 0.07–0.20 мм, а также сульфиды цинка и меди. Переработано 3200 кг концентрата, время работы активатора ~30 ч.

Активатор показал надежную, устойчивую работу. Расход электроэнергии 20–25 (кВт·ч)/т концентрата.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований, выполненных на Васильковской ОЗИФ, показали, что разработанная технология переработки золото- и серебросодержащего арсено-пиритного концентрата, включающая механохимическое вскрытие, последующее выщелачивание цианистыми растворами и электролитическое извлечение благородных металлов из осветленных растворов на катоды из углеродных волокнистых материалов, позволяет существенно улучшить процесс извлечения золота и серебра, увеличить степень их извлечения из концентрата в раствор до 91.0–95.2 и 86.2–93.7 % соответственно, эффективно извлекать металлы из раствора, многократно использовать растворы в цикле “электролиз – выщелачивание”, получать высокопробную готовую продукцию в виде сплава металлов с суммарным содержанием золота и серебра до 95 %.

Результаты промышленных испытаний показали, что механохимическое вскрытие и активатор, использованные для извлечения золота и серебра из упорных арсено-пиритных гравиконоцентратов месторождений Северного Казахстана, позволили повысить скорость и степень извлечения золота и серебра, что хорошо согласуется с результатами исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Седельникова Г. В. // Золотодобывающая пром-сть. 2015. Т. 72, № 6. С. 14–22.
- 2 Захаров Б. А., Меретуков М. А. Золото: упорные руды. М.: Руда и Металлы, 2013. 452 с.

- 3 Лодейщиков В. В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. Иркутск: Иргиредмет, 1999. 342 с.
- 4 Судаков Д. В., Челноков С. Ю., Русалев Р. Э., Елшин А. Н. // Цветные металлы. 2017. № 3, С. 40–44.
- 5 Седельникова Г. В., Курков А. В., Смирнов К. М. // Цветные металлы. 2016. № 8. С. 24–32.
- 6 Варенцова В. И., Варенцов В. К., Болдырев В. В. // Журн. прикл. химии. 1990. Т. 63, № 3. С. 560-565.
- 7 Варенцова В. И. Варенцов В. К., Болдырев В. В. // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук. 1983. Вып. 5, № 12, С. 114–116.
- 8 Варенцова В. И., Варенцов В. К., Лукьянов В. О., Болдырев В. В. // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук. 1989. Вып. 5. С. 32–36.
- 9 Варенцов В. К. Современные проблемы технической электрохимии. Ч. 1. Трехмерные проточные электроды. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. 118 с.
- 10 Варенцов В. К., Кошев А.Н., Варенцова В. И. Современные проблемы электролиза и задачи оптимизации процессов в реакторах с трехмерными углеродными электродами: монография. Пенза: ПГУАС, 2015. 288 с.
- 11 Молчанов В. И., Селезнева О. Г., Жирнов Е. И. Активация минералов при измельчении. М.: Недра, 1988. 208 с.
- 12 Зеленов В. И. Методика исследования золотосодержащих руд. М.: Недра, 1978. 302 с.
- 13 Варенцов В. К. // Хим. уст. разв. 1997. № 2. С. 147–156.
- 14 Варенцов В. К. Современные проблемы технической электрохимии. Ч. 3. Электрохимические реакторы и процессы с проточными углеродными электродами. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 123 с.

