УДК ***669.213:66.067.8***

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЗОЛОТА ИЗ ПРУДКОВЫХ ВОД ХВОСТОХРАНИЛИЩА ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТОДОМ СОРБЦИИ

Чулиев Фархад Гафурович
АО «Навоийский горно-металлургический комбинат», директор ГМЗ-5, PhD
Хамидов Рустам Абдугафурович
Навоийский государственный горно-технологический университет, доцент, PhD
Икромидинова Угилой Уктам кизи
Навоийский государственный горно-технологический университет, магистрант
Эшмурадова Зухра Бобир қизи
Навоийский государственный горно-технологический университет, магистрант

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрена возможность извлечения золота из прудковых вод хвостохранилища гидрометаллургического производства золота. Представлены результаты исследований солевого и элементного состава оборотной воды, а также экспериментальные данные по сорбционному извлечению золота и серебра в динамическом режиме с использованием активированного угля и ионообменной смолы. Установлено, что активированный уголь обладает более высокой селективностью и сорбционной ёмкостью по золоту и серебру по сравнению с ионообменной смолой. Проведено изучение кинетики сорбции золота на активированном угле, показано, что максимальная ёмкость сорбента достигается при времени контакта около 90 часов и составляет до 0,8 мг/г. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности вовлечения прудковых вод хвостохранилищ в переработку с целью дополнительного извлечения драгоценных металлов и повышения экологической безопасности производства.

Ключевые слова: *золото, прудковые воды, хвостохранилище, сорбция, активированный уголь, ионообменная смола, оборотные воды, гидрометаллургия, кинетика сорбции, селективность*

ANNOTATSIYA

Maqolada oltin gidrometallurgik ishlab chiqarishining chiqindixona hovuz suvlaridan oltinni ajratib olish imkoniyati ko‘rib chiqilgan. Aylanma suvlarning tuzli va element tarkibi, shuningdek faollashtirilgan ko‘mir va ion-almashinuv qatroni yordamida dinamik rejimda oltin va kumushni sorbtsion ajratib olish bo‘yicha tajriba natijalari keltirilgan. Tadqiqotlar natijasida faollashtirilgan ko‘mir ion-almashinuv qatroniga nisbatan oltin va kumush bo‘yicha yuqori sorbtsion sig‘im va selektivlikka ega ekanligi aniqlangan. Faollashtirilgan ko‘mirda oltin sorbtsiyasi kinetikasi o‘rganilib, maksimal sorbtsion sig‘im 90 soat davomida erishilishi va 0,8 mg/g ni tashkil etishi aniqlangan. Olingan natijalar chiqindixona hovuz suvlarini qayta ishlash orqali qimmatbaho metallarni qo‘shimcha ajratib olish va ishlab chiqarishning ekologik xavfsizligini oshirish imkoniyatini tasdiqlaydi.

Kalit so‘zlar: *oltin, hovuz suvlar, chiqindixona, sorbtsiya, faollashtirilgan ko‘mir, ion-almashinuv qatroni, aylanma suvlar, gidrometallurgiya, sorbtsiya kinetikasi, selektivlik.*

ABSTRACT

The paper considers the possibility of gold recovery from pond waters of a tailings storage facility at a hydrometallurgical gold production plant. The chemical and ionic composition of process waters is analyzed, and experimental results on the sorption recovery of gold and silver in dynamic mode using activated carbon and ion-exchange resin are presented. The study demonstrates that activated carbon exhibits higher sorption capacity and selectivity for gold and silver compared to ion-exchange resin under conditions of high water mineralization. The kinetics of gold sorption on activated carbon was investigated, showing that the maximum sorption capacity of about 0.8 mg/g is achieved after approximately 90 hours. The obtained results confirm the feasibility of involving tailings pond waters in processing in order to enhance precious metal recovery and improve the environmental performance of hydrometallurgical operations.

Keywords: *gold, pond water, tailings storage facility, sorption, activated carbon, ion-exchange resin, process water, hydrometallurgy, sorption kinetics, selectivity.*

ВВЕДЕНИЕ

В условиях истощения минерально-сырьевой базы и вовлечения в переработку все более бедных и упорных руд особую актуальность приобретает извлечение ценных компонентов из техногенных источников. К числу таких

источников относятся прудковые воды хвостохранилищ гидрометаллургических производств, которые традиционно рассматриваются как отход, однако на практике содержат растворённые формы золота, серебра и сопутствующих металлов [1].

Наличие растворённого золота в оборотных водах приводит не только к прямым потерям драгоценного металла, но и к экологическим рискам, связанным с накоплением токсичных компонентов и повышенной минерализацией вод. В этой связи разработка и совершенствование технологий извлечения золота из прудковых вод является востребованной как с экономической, так и с экологической точек зрения [2].

Сорбционные методы извлечения драгоценных металлов отличаются относительной простотой аппаратурного оформления, возможностью работы в непрерывном режиме и высокой эффективностью при низких концентрациях металлов. Поэтому исследование сорбции золота из оборотных вод хвостохранилищ с использованием различных сорбентов представляет собой актуальную научно-практическую задачу [3].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе исследований был изучен солевой и элементный состав исходной прудковой воды хвостохранилища. Установлено, что вода характеризуется щелочной реакцией среды (pH ≈ 9), высокой жёсткостью (25,9 мг-экв/дм³) и значительным содержанием растворённых солей кальция, натрия, калия, сульфатов, хлоридов и нитритов (табл. 1). Концентрация золота в исходной воде составляла 0,035 мг/л, серебра — 0,16 мг/л (табл. 2).

Сорбционные испытания проводились в динамическом режиме с использованием лабораторных колонок для сорбции и хроматографии (рис. 1). Через колонны непрерывно пропускали исходную воду прудка при постоянном расходе. В качестве сорбентов использовались активированный уголь и ионообменная смола, помещённые в колонки равными навесками.

После завершения сорбции проводился анализ состава воды и сорбентов на содержание золота, серебра и металлов-примесей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Солевой состав прудковых приведен ниже в таблице 1, где pH – 9 и жёсткость воды составляет 25,9 мг-экв/дм^3.

Таблица 1

Содержание основных элементов и соединений в исходной воде прудка

Наименование	Показатель	Наименование	Показатель
Ca^{+2} (мг/дм^3)	520	Cr (мг/дм^3)	< 0,05

Mg^{+2} (мг/дм^3)	< 1,0	As (мг/дм^3)	25,0
$Fe_{общ}$ (мг/дм^3)	0,25	K (мг/дм^3)	515,0
Cl (мг/дм^3)	510,0	Na (мг/дм^3)	550,0
NO_2^- (мг/дм^3)	450,0	CO_3^{2-} (мг/дм^3)	320,0
NO_3^- (мг/дм^3)	60	Pb (мг/дм^3)	0,10
SO_4^{2-} (мг/дм^3)	1800	Zn (мг/дм^3)	< 0,05
Mn (мг/дм^3)	0,058	Ni (мг/дм^3)	0,045
Cu (мг/дм^3)	0,116	Co (мг/дм^3)	0,12

Результаты экспериментов показали, что оба исследуемых сорбента обеспечивают снижение концентрации золота и серебра в воде, однако активированный уголь проявляет более выраженные селективные свойства. После сорбции на активированном угле концентрация золота снизилась до 0,01 мг/л, тогда как при использовании ионообменной смолы — до 0,015 мг/л. Аналогичная тенденция наблюдается и для серебра (табл. 2).

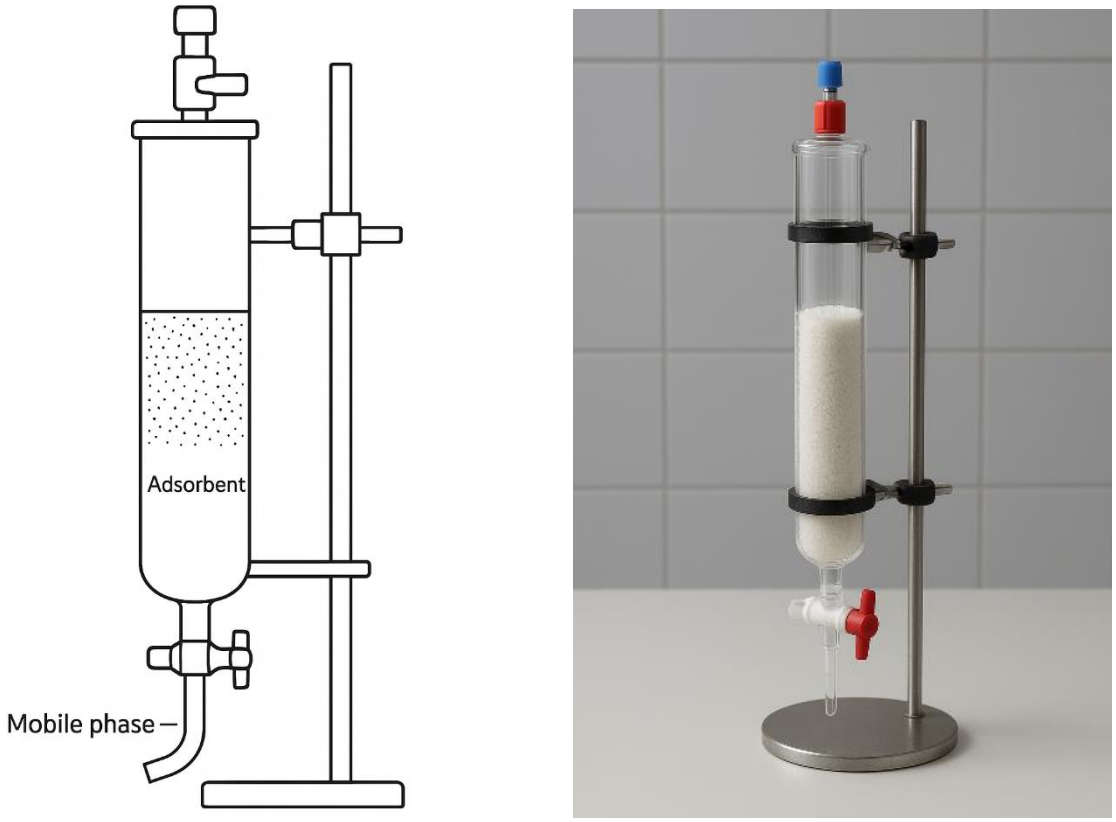

Рис. 1. Специальные лабораторные колонки для сорбции и хроматографии

Таблица 2

Содержание золота, серебра и примесей в исходной воде прудка и после сорбции

Наименование		Концентрация, мг/л					
		Au	Ag	Cu	Fe	Ni	Zn
Исходная проба		0,035	0,16	2,0	0,35	0,87	0,15
После сорбции	Активированный уголь	0,01	0,1	0,47	следы	0,63	0,12
	Ионообменная смола	0,015	0,12	1,75	следы	0,69	0,11

Анализ состава насыщенных сорбентов (табл. 3) показал, что ёмкость активированного угля по золоту и серебру заметно выше, чем у ионообменной смолы, при одновременном меньшем захвате металлов-примесей. Это свидетельствует о более высокой селективности угля в условиях высокой минерализации оборотной воды.

Таблица 3

Содержание золота, серебра и примесей в сорбентах

Сорбент	Содержание элементов, мг/г					
	Au	Ag	Cu	Ni	Fe	Zn
Активированный уголь	0,60	1,34	25,6	4,5	1,00	0,75
Ионообменная смола	0,58	0,66	23,2	3,0	0,56	0,87

В связи с этим, в дальнейших исследованиях в качестве сорбента использовался активированный уголь. На нём проведён ряд экспериментов с целью изучения кинетики сорбции. Работа заключалась в сорбции золота из оборотной воды на сорбент (порциями по 1 г) в динамическом режиме (V =3 л/ч). При этом через 12, 24, 36, 48, 72 и 96 ч порции сорбента извлекались из колонн и анализировались на содержание золота. Результаты представлены на рисунке 2.

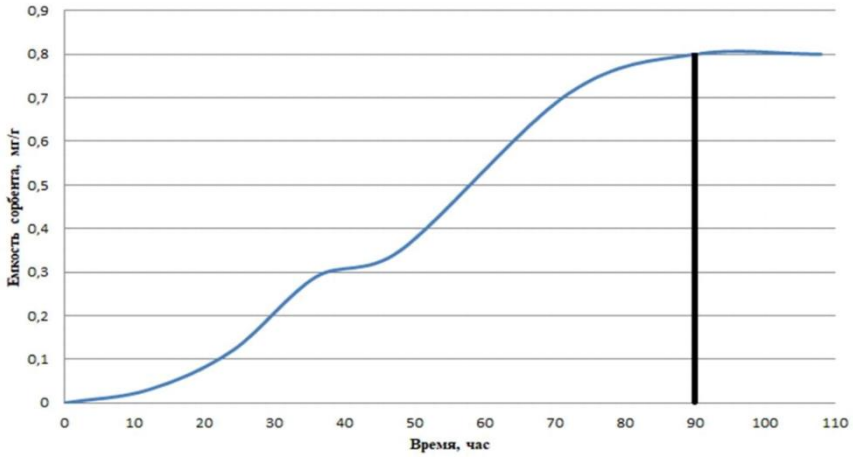

Рис. 2. Зависимость насыщения сорбента золотом от времени сорбции из оборотной воды с исходной концентрацией $C_{исх.}$ = 0,035 мг/л

Установлено, что процесс сорбции протекает постепенно, а максимальная ёмкость активированного угля по золоту достигается примерно через 90 часов и составляет около 0,8 мг/г. Дальнейшее увеличение времени контакта не приводит к существенному росту извлечения, что указывает на приближение сорбента к состоянию насыщения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведённые исследования показали, что прудковые воды хвостохранилища гидрометаллургического производства золота содержат растворённые формы золота и серебра, представляющие практический интерес для дополнительного извлечения. Установлено, что сорбционные методы в динамическом режиме обеспечивают эффективное снижение концентраций драгоценных металлов в оборотной воде и могут рассматриваться как перспективное направление переработки техногенных вод.

Сравнительный анализ активированного угля и ионообменной смолы показал преимущество активированного угля, который характеризуется более высокой сорбционной ёмкостью и селективностью по золоту и серебру при одновременном меньшем извлечении металлов-примесей в условиях высокой минерализации воды.

Экспериментальное изучение кинетики сорбции позволило установить, что максимальное насыщение активированного угля золотом достигается примерно через 90 часов и составляет до 0,8 мг/г, после чего процесс практически выходит на стадию равновесия.

Полученные результаты подтверждают целесообразность вовлечения прудковых вод хвостохранилищ в технологический цикл с целью повышения

комплексности использования минерального сырья, сокращения потерь драгоценных металлов и снижения экологической нагрузки на окружающую среду.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Санакулов Кувандик Санакулович. Современные направления комплексной переработки упорных золотосодержащих руд и техногенных отходов гидрометаллургического производства / К. С. Санакулов // Горный вестник Узбекистана. – 2018. – № 3. – С. 45–52.
2. Санакулов К. С. Техногенные источники драгоценных металлов и пути повышения их вовлечения в переработку // Цветные металлы. – 2019. – № 9. – С. 32–38.
3. Санакулов К. С., Ибрагимов А. А., Нурматов Б. Б. Сорбционные методы извлечения золота из оборотных и сточных вод гидрометаллургических предприятий // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2020. – № 6. – С. 88–95.