



ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ
БЕЙОРГАНИКАЛЫҚ ЗАТТАРДЫҢ ХИМИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯСЫ
CHEMICAL TECHNOLOGY OF INORGANIC SUBSTANCES

DOI 10.51885/1561-4212_2023_1_147
MPHTI 61.31

В.В. Литвинов¹, Д.А. Айтекенова², И.П. Журавлев², Н.В. Серая³, Г.К. Даумова³

¹ТОО «Проектно-экологическое бюро», г. Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: litvinov_vadim@mail.ru

²ТОО «Сары Казна», Республика Казахстан, г. Балхаш, Казахстан

E-mail: ecologist@kounrad.kz

E-mail: izhuravlev@sarykazna.kz

³Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: nseraya@mail.ru

E-mail: gulzhan.daumova@mail.ru*

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТВАЛЬНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ
МЕДИ ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ КОУНРАДСКОГО
РУДНИКА В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ**

**ҚЫСҚЫ ЖАҒДАЙЛАРДАҒЫ ҚОҢЫРАТ КЕНІШІНІҢ ТЕХНОГЕНДІК МИНЕРАЛДЫҚ
ТҮЗІЛІМДЕРІНЕН МЫСТЫ ҮЙІНДІЛІК СІЛТІСІЗДЕНДІРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЖЕТІЛДІРУ**

**IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF DUMP LEACHING OF COPPER FROM
TECHNOGENIC MINERAL FORMATIONS OF THE KOUNRAD MINE IN WINTER
CONDITIONS**

Аннотация. Представлено усовершенствование технологии выщелачивания меди из отвалов техногенных минеральных образований Коунрадского рудника в условиях отрицательных температур. Дано описание экспериментальных данных и предложена реализация технологии круглогодичного отвального выщелачивания с использованием различного спектра технических решений, позволяющих функционировать в условиях отрицательных температур и направленных на продление сезона отвального выщелачивания в холодное время года: подогрев раствора для выщелачивания; укрытие отвала теплоизолирующим материалом (геокомпозитом); контроль и автоматическое регулирование температуры на поверхности блоков отвалов. В результате опытно-промышленных испытаний установлено, что рафинат на отвалы может безопасно подаваться при более низкой температуре – около 12 °С (вместо 18-20 °С). Показано, что температуру выщелачивающего раствора (рафината) можно изменять в зависимости от температуры наружного воздуха, используя автоматический регулятор расхода топлива, что является целесообразным и экономически выгодным.

Ключевые слова: отвальное выщелачивание, геокомпозит, отрицательная температура; температурные датчики; извлечение меди.

Аңдатпа. Қоңырат кенішінің техногендік минералдық түзілімдерінің үйінділерінен мысты төмен температурада сілтісіздендіру ұсынылған. Эксперименттік деректерге сипаттама берілді және теріс температура жағдайларында жұмыс істеуге мүмкіндік беретін және жылдың суық мезгілінде үйінділік сілтісіздендіру маусымын ұзартуға бағытталған техникалық шешімдердің әртүрлі спектрін пайдалана отырып, үйінді сілтісіздендіру технологиясын іске асыру

ұсынылды: сілтісіздендіру үшін ерітіндіні жылыту; үйіндіні жылу оқшаулағыш материалмен (геокомпозитпен) жабу; үйінді блоктарының бетіндегі температураны бақылау және автоматты реттеу. Тәжірибелік-өндірістік сынақтардың нәтижесінде үйінділерге рафинаттың неғұрлым төмен температурада – шамамен 12 °С (18-20 °С орнына) қауіпсіз берілуі мүмкін екендігі анықталды. Сілтісіздендіру ерітіндісінің (рафинаттың) температурасын сыртқы ауа температурасына байланысты отын шығынын автоматты реттегішті қолдана отырып өзгертуге болатындығы көрсетілген, бұл орынды және экономикалық жағынан үнемді болып келеді.

Түйін сөздер: үйінділік сілтісіздендіру, геокомпозит, теріс температура; температуралық датчиктер; мысты алу

Abstract: The leaching of copper from the dumps of technogenic mineral formations of the Kounrad mine at a reduced temperature is presented. The experimental data are described and the implementation of the dump leaching technology is proposed using a different range of technical solutions that allow operating in conditions of negative temperatures and aimed at prolonging the dump leaching season in the cold season: heating of the leaching solution; covering the dump with a heat-insulating material (geocomposite); control and automatic temperature control on the surface of the dump blocks. As a result of pilot tests, it was found that raffinate can be safely fed to dumps at a lower temperature - about 12 °C (instead of 18-20 °C). It is shown that the temperature of the leaching solution (raffinate) can be changed depending on the outside air temperature using an automatic fuel consumption regulator, which is expedient and economical.

Keywords: dump leaching, geocomposite, negative temperature; temperature sensors; copper extraction

Введение. Рост производства меди в последнее время во многом связан с широким внедрением в промышленность технологии кучного выщелачивания (КВ).

Кучное выщелачивание полезных ископаемых является одним из наиболее распространенных процессов в горнодобывающей и металлургической промышленности. Этот процесс моделировался многими авторами. За последние годы исследователи совершенствовали технологию кучного выщелачивания, применяя различные методы. В работе [1] рассмотрено моделирование технологии кучного выщелачивания отвала техногенного массива, где учтены различные варианты формирования напряженного состояния отвала в результате его насыщения растворами и передачи нагрузки от транспортного оборудования. Сделаны прогнозные оценки поведения массива штабеля в период его сооружения и эксплуатации.

Результаты проверки математической модели теплового баланса рудного штабеля при кучном выщелачивании золота в условиях сурового климата представлены в работе [2]. Усовершенствованная модель позволяет рассчитать тепловой баланс штабеля в зоне многолетней мерзлоты при работе в теплый период года (начало орошения – июнь, окончание – октябрь).

Возможность вовлечения в переработку забалансовых медных руд с целью доизвлечения из них ценных компонентов была рассмотрена в работе [3]. На основании изучения химического и минералогического состава забалансовых руд определено, что оптимальным способом их переработки является кучное выщелачивание. Приведены результаты по сернокислотному выщелачиванию минералов меди, содержащихся в составе забалансовых руд, и определено, что оптимальными условиями сернокислотного выщелачивания являются концентрация серной кислоты 50...75 г/л и продолжительность 15 дней. В этих условиях степень извлечения оксидов меди в раствор составляет 98,5-99,0 %, сульфидов меди 5,6 %.

Автором [4] проведен обзор, где рассмотрены химические и физические процессы, влияющие на полноту и скорость растворения меди в условиях подземного выщелачивания. Наиболее распространенные медные порфировые руды либо имеют природную структуру, проницаемую для растворов выщелачивания, либо проницаемость может быть создана искусственно с помощью гидравлического (ниже уровня подземных вод) или взрывного

(выше уровня вод) воздействия. Факторы, со временем снижающие проницаемость рудного тела, могут быть обусловлены физическими или химическими процессами. Следствием является блокирование открытых пор газами, гипсом, ярозитами и механическими взвесями. Эффективность подземного выщелачивания при переработке руд, содержащих окисленные минералы меди, зависит от концентрации в растворе и относительного объема серной кислоты, в то время как при наличии вторичных сульфидов меди – от концентраций кислоты и окислителя.

Авторы описывают возможности переработки бедных сульфидных руд и шахтных отходов методами кучного и бактериального выщелачивания [5]. На примере золотых и серебряных руд проанализированы особенности и технологии переработки для интенсификации кучного выщелачивания в суровых климатических условиях. В статье представлены перспективы кучного выщелачивания сульфидных и смешанных руд Удоканского (Россия) и Талвиваарского (Финляндия) месторождений, а также техногенных отвалов – отвалов Аллареченского месторождения (Россия). В работе также приведены лабораторные результаты выщелачивания цветных металлов из бедных медно-никелевых руд Мончеплутонской площади и из хвостов ОАО «Кольская горно-металлургическая компания».

В работе [6] приведен научный обзор по применению различных методов выщелачивания в горнодобывающей промышленности Китая, используемых для обработки руд с низким содержанием золота и меди, редкоземельных руд ионно-адсорбционного типа, а также урановых руд как из твердых пород, так и из песчаника. Кучное выщелачивание является хорошо зарекомендовавшим себя гидрометаллургическим методом извлечения, за последние 50 лет широко применяемым для обработки неблагородных металлов, таких как медь, и драгоценных металлов, таких как золото.

По результатам работы [7] на примере медного рудника Янгла (Китай) было выявлено, что извлечь медь из руд с низким содержанием оксида меди можно с применением ряда технологических усовершенствований, в том числе гидрометаллургическим методом с использованием кучного выщелачивания.

Кучное выщелачивание является надежной технологией переработки и извлечения металлов из низкосортных руд как небольших, так и крупных месторождений.

Авторами [8] проведен анализ уровня развития физико-химической геотехнологии кучного выщелачивания золота по ведущим странам золотодобычи с помощью патентно-информационного исследования технических решений. Дана сравнительная количественная оценка техническим решениям по объектам изобретений при двух режимах выщелачивания – сезонном и круглогодичном. Количество выявленных патентов для работы в режиме сезонного выщелачивания превышает в семь раз их количество при круглогодичном выщелачивании в условиях криолитозоны. На основании технико-экономической оценки установлено преимущество круглогодичного выщелачивания золота в криолитозоне по сравнению с сезонной работой установок. Также было установлено, что по количеству патентов круглогодичного выщелачивания золота Российская Федерация опережает такие страны, как США, Канада, Китай и Австралия.

В работе [9] представлена информация, определяющая порядок и возможность проведения работ по кучному выщелачиванию золотосодержащих руд в условиях холодного климата на территории Российской Федерации с учетом специфики сооружения рудного штабеля, особенностей работы технологического оборудования, выбора режимов переработки золотосодержащих руд и оценки основных технологических параметров процесса.

Информационный обзор о технологиях кучного выщелачивания для извлечения ценных металлов представлен авторами в статье [10]. Отмечено, что в горнодобывающей промышленности кучное выщелачивание является экологически эффективным методом извлечения ценных/полезных металлов из низкокачественной руды.

Авторами [11] были проанализированы тематические исследования, для которых были зарегистрированы характеристики как колонного, так и кучного выщелачивания растворимых в кислоте медных, сульфидно-медных и золотых руд. Установлено, что объемная плотность и расстояние между капельницами влияют на длину диффузионного пути через неподвижный раствор колонны/кучи.

В работе [12] авторы предложили использовать новую методологию оптимизации извлечения минералов на этапе кучного выщелачивания с учетом минералогической изменчивости сырья путем изменения режима работы в зависимости от типа руды в сырье. Операционные изменения, рассматриваемые в анализе, включают выщелачивание оксидных руд с добавлением только серной кислоты (H_2SO_4) в качестве реагента и добавлением хлорида в случае сульфидных руд (вторичных сульфидов). Моделирование и симуляция этой производственной фазы указывает на возможность решения проблемы динамики изменения подачи за счет реализации чередующихся режимов работы.

В работе [13] описываются исследования аналитических моделей кучного выщелачивания с использованием анализов неопределенности и общей чувствительности.

Анализ неопределенностей (UA) используется для количественной оценки влияния величины неопределенностей входных переменных на извлечение кучного выщелачивания. Анализ общей чувствительности (GSA) используется для изучения характера связей между извлечением и входными переменными модели выщелачивания. Полученная информация позволяет изучить некоторые приложения кинетической модели.

Проведенный аналитический обзор позволил установить, что кучное выщелачивание имеет ряд преимуществ по сравнению с обычной технологией производства металлов:

- простота технологии;
- низкие капитальные и эксплуатационные затраты;
- быстрое во времени начало эксплуатации;
- менее сложная система охраны окружающей среды.

Основной недостаток технологии кучного выщелачивания связан с потенциально более низкой степенью извлечения металлов из руды в зимний период по сравнению с обычной, стандартной технологией.

Выщелачивание в отвалах – один из методов кучного выщелачивания – способ переработки выщелачиванием забалансовых и бедных балансовых крупнокусковых руд в отвалах, извлечение из которых полезных компонентов обычными обогатительными или гидрOMETаллургическими методами является нерентабельным. При этом способе подвергают выщелачиванию старые отвалы, размещенные на естественном грунте. Отвальное выщелачивание отличается от кучного тем, что работа производится на отвалах, образованных и заскладированных без особых требований на поверхности земли. Исходным сырьем в данном случае являются отвалы породы, добываемой при вскрытии месторождения открытым способом. При данном способе происходит переработка низкосортного сырья.

В работе [14] установлено, что при отвальном выщелачивании меди руду можно орошать кислым выщелачивающим раствором для образования водных ионов двухвалентной меди для дальнейшей обработки. В исследовании также изучалось выщелачивание крупной сульфидной медной руды с размером верхней части от 150 до 250 мм. Смодели-

рованные рядовые размеры руды выщелачивались более шести месяцев. Результаты показали, что выщелачивание вызывает разрушение частиц. Это разрушение приводит к непрерывному образованию мелких частиц и непрерывной подаче свежих минеральных поверхностей для выщелачивания. Отвальное выщелачивание можно объяснить механизмом дробления и образования мелочи. Скорость выщелачивания меди в отвалах является производением скорости образования мелочи и скорости выщелачивания мелочи.

В настоящее время для выщелачивания меди из отвалов техногенных минеральных образований (ТМО) Коунрадского рудника (медное месторождение Коунрад, Карагандинская область, Казахстан) в зимних условиях применяется комплексный метод решения проблемы. На основании теории процесса выщелачивания в отвалах, анализа литературных источников и практического опыта работы предприятий, используется способ укрытия зимних блоков орошения с применением в качестве укрывного материала геокомпозита [15], обладающего высокими термоизоляционными свойствами, позволяющими поддерживать положительные температуры на поверхности блоков в зимний период и проводить процесс выщелачивания в течение всего календарного года.

Однако используемая базовая технология сезонного отвального выщелачивания меди, имеет ряд существенных недостатков, ограничивающих область ее применения. К наиболее существенному относится отсутствие направленного регулирования процессом теплообмена внутри рудного штабеля при выщелачивании в условиях низких температур. При выщелачивании в таких условиях значительно снижается интенсивность растворения металлов и скорость миграции металлоносных растворов. Поэтому дальнейшее совершенствование технологии отвального выщелачивания заключается в создании таких технических решений, которые позволят не только снизить воздействие низких температур горных пород на процесс извлечения золота, но и продлить сезон работы вплоть до круглогодичного.

При резко континентальном климате данной местности одним из приоритетных путей повышения извлечения меди является оптимизация температурного режима выщелачивания, которая может быть выполнена с помощью применения кинетической модели, учитывающей влияние температуры на скорость извлечения металла из руды. Простейшим способом её реализации является установление датчиков контроля температуры на блоках системы орошения для регулирования расхода топлива, в зависимости от температуры наружного воздуха.

Подобное техническое решение было предложено в работе [16], где поточная линия для круглогодичного кучного выщелачивания металлов из руд включала последовательно установленные друг за другом рудный штабель, систему дренажа, железобетонную кювету, борт кюветы, насос, трубопровод, устройство для подогрева раствора, систему орошения, укрытую теплозащитным материалом, устройство для приема насыщенных растворов, насос с напорным трубопроводом, комплекс устройств для сбора и переработки насыщенных растворов, систему вертикальных и наклонных перфорированных труб, установленных в штабеле и снабженных датчиками измерения температуры, соединенными гибкой связью с устройством контроля и управления технологическим процессом.

Системы регулирования температуры руды и выщелачивающего раствора были использованы в работе [17] при выщелачивании золота из полифракционной руды при пониженной температуре. Авторами создана установка низкотемпературного выщелачивания золота для изучения влияния температуры руды на основные технологические параметры

процесса КВ при температурах руды и выщелачивающего раствора от 1 до 20 °С. В качестве датчиков температуры на установке используются термодатчики, вторичные приборы – контроллеры температуры.

Опыт применения температурного контроля при кучном выщелачивании позволил установить основные преимущества использования температурных датчиков:

- возможность вести выщелачивание сформированного штабеля в требуемом фильтрационном режиме;
- возможность управления температурным режимом в штабеле в холодный период времени для поддержания эффективного режима выщелачивания металлов из руд;
- повышение технологических показателей поточной линии;
- контроль режимных параметров позволяет повысить экологическую безопасность и надежность технического решения.

Таким образом, целью настоящей работы является теплофизическое обоснование повышения эффективности круглогодичного отвального выщелачивания из техногенных минеральных образований (ТМО) Коунрадского рудника при использовании системы температурного контроля.

Материалы и методы исследования. Поверхность отвалов выравнивают, монтируют систему орошения и вдоль отвала в самых низких частях рельефа сооружают специальным образом подготовленные сборные каналы. По периметру основания отвала сооружают наблюдательные скважины для контроля возможных утечек растворов и в случае необходимости выполняют дополнительные сборные каналы. Процесс выщелачивания состоит из капельного орошения отвалов ТМО Коунрадского рудника и сбора раствора. Применяемая система орошения обеспечивает равномерность распределения рафинатного раствора, возможность промывки основного и вспомогательных трубопроводов, возможность организации утепления системы орошения в зимнее время.

Выщелачивающий раствор после подкисления серной кислотой в необходимом для процесса количестве подают из хранилища рафината системой насосов через распределительную систему и орошающие устройства на поверхность отвала. Выщелачивающие растворы, подаваемые на отвал, просачиваясь через слой отвала под действием силы тяжести, выщелачивают (растворяют) из него медь. При взаимодействии медьсодержащих минералов с серной кислотой получается насыщенный медьсодержащий раствор, который поступает в сборные каналы и пруды-сборники продуктивного раствора.

После выщелачивания продуктивные растворы из прудов насосами подают в баки-сборники установки селективной экстракции корпуса экстракции.

Для минимизации тепловых потерь и снижения рисков замерзания системы орошения на Коунрадском руднике в зимний период внедрен и совершенствуется метод утепления – укрытие зимних блоков геокомпозитом и мешками для предотвращения перемерзания мелких капиллярных трубок и адаптеров (рис. 1). Даже в самые суровые морозы отвалы не промерзают полностью и прогретые за летний сезон в зимнее время постоянно парят. Укрытые непроницаемым материалом зимние блоки создают своеобразный эффект парника, который поддерживает постоянный микроклимат под пленкой и снижает тепловые потери.



Рисунок 1. Общий вид зимних блоков

С целью улучшения, ускорения и автоматизации процесса измерения температуры подачи рафината на отвалы установлены беспроводные температурные датчики Вега ТД-11 для снятия показаний с внешних температурных датчиков (входят в комплект поставки) с последующим накоплением и передачей данных о температуре в операторную в режиме реального времени (рис. 2). В этом случае оператор получает достаточно актуальной информации, чтобы эффективно управлять котельной, увеличивая и уменьшая скорость подачи угля. Для внедрения датчиков температуры, после анализа доступных вариантов, был установлен комплект системы тестового мониторинга с возможностью подключения к ПК через базовую станцию Вега БС-1.2. Редуктор из нержавеющей стали и датчики температуры были установлены на концевых трубопроводах капиллярных трубок на самых холодных участках блоков отвалов (рис. 3).



Рисунок 2. Температурный датчик Вега ТД-11

Результаты и обсуждения. Опыт использования температурных датчиков в системе выщелачивания отвалов техногенных минеральных образований (ТМО) Коунрадского

рудника в зимних условиях позволил получить следующие данные.

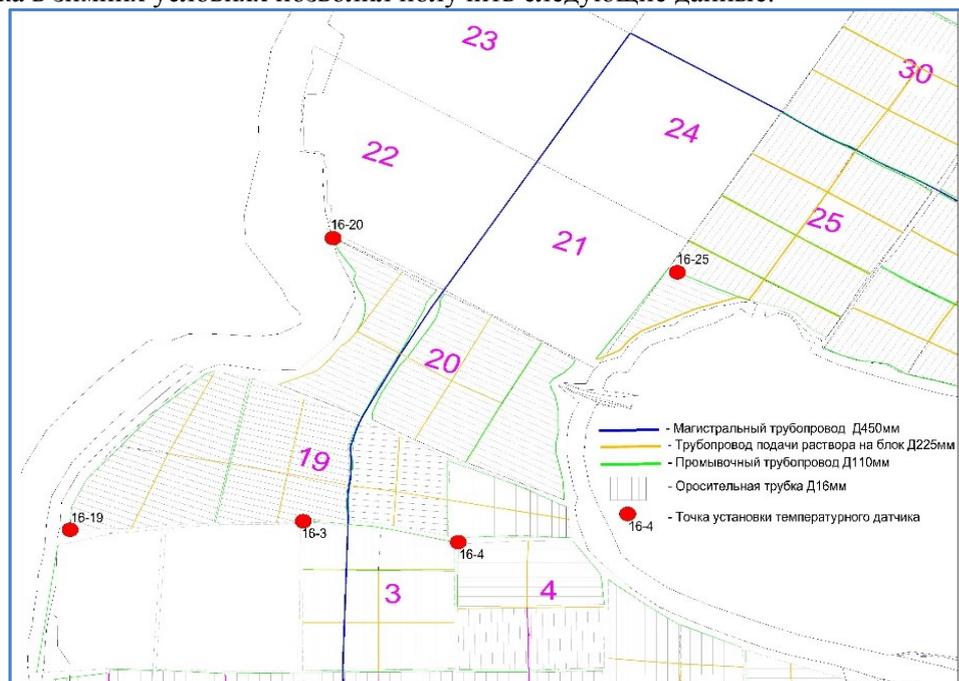


Рисунок 3. Точки установки температурных датчиков (2021 г.)

Оптимальная температура рафината для выщелачивания блоков восточных отвалов в зимний период составляет около 12°C . Для выщелачивания западных отвалов, которое началось в зимний период 2017-18 гг., потребовалась температура рафината на уровне около 18°C , а иногда и 20°C , чтобы предотвратить замерзание капиллярных трубок. Это объясняется тем, что средняя высота отвала 5 (восток), на котором производится зимнее выщелачивание последние 5 лет, составляет 27,8 метров, тогда как средняя высота отвала 16 (запад) – 44,6 метров. С учетом среднего значения вертикального градиента температуры (изменения температуры воздуха на $0,6^{\circ}\text{C}$ на каждые 100 м), времени года (зимой температура ниже, летом – выше) и времени суток (ночью холоднее, чем днем) средняя температура воздуха на западных отвалах ниже, чем на восточных отвалах (рис. 4).

Температура раствора на концах капиллярных трубок измерялась вручную с помощью температурного датчика, замеры проводились несколько раз в дневное время суток, в ночное время замеры не проводились. В этой связи, температура рафината поддерживалась на высоком уровне при помощи повышения нагрева котлов для предотвращения замерзания капиллярных трубок в ночное время, частичное или полное замерзание которых имеет негативные экономические последствия.

В зимний период перед подачей рафинатного раствора на блоки отвалов происходит понижение его температуры после теплообменника (несмотря на утепление напорной и приёмной магистралей) за счет прохождения длинного пути по магистральным трубопроводам, трубопроводам блоков, через 16-миллиметровые оросительные капиллярные трубки и промысловые трубы. Таким образом, на концах промысловых трубопроводов отмечается самая низкая температура рафинатного раствора, и как следствие, эти участки выщелачиваемых блоков остаются самыми холодными (рис. 5).

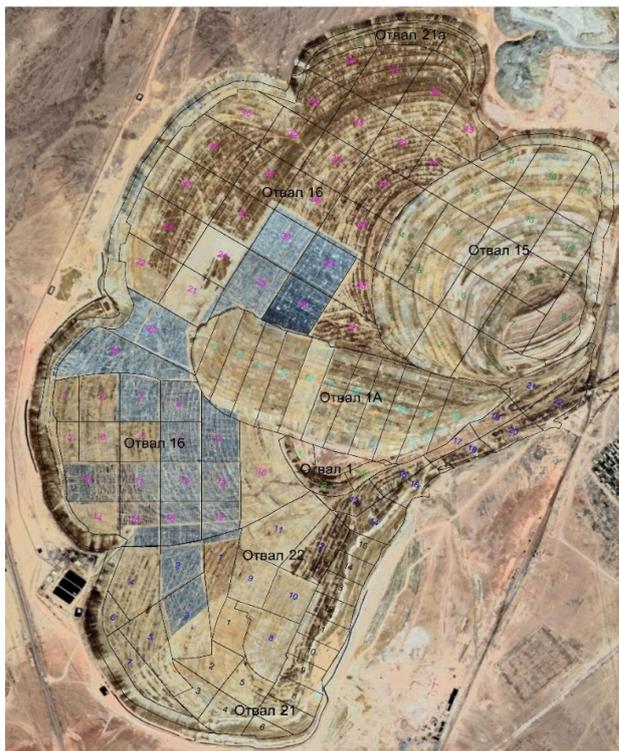


Рисунок 4. Общий вид отвала с границами блоков орошения (запад)

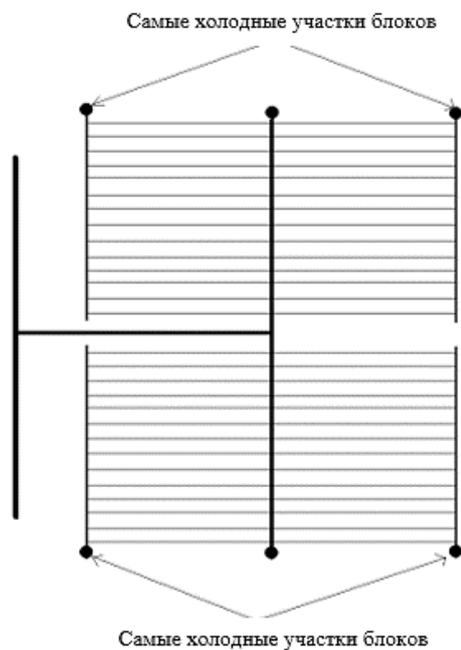


Рисунок 5. Схема расположения холодных участков выщелачиваемых зимних блоков
На первых двух этапах опытно-промышленных испытаний постоянное регулирование

температуры подачи рафината на отвалы не проводилось. Для контроля состояния оросительной системы на западных отвалах применяли измерение температуры промывочных труб один раз в день в ручном режиме. Измерения указанным способом проверки состояния оросительной системы занимали длительный промежуток времени (более половины дня), к концу измерений показатели температуры становились неактуальными, в следствие этого эффективное управление котельной не представлялось возможным.

Поэтому общая температура рафината поддерживалась на уровне $\approx +18\text{ }^\circ\text{C}$ на протяжении всего времени, за исключением самых холодных дней, когда температура повышалась по мере необходимости. Однако используемый метод недостаточно эффективен, так как не позволяет оперативно и своевременно учитывать повышение температуры воздуха для регулирования (снижения) температуры подаваемого на выщелачивание рафинатного раствора за счет снижения мощности работы котельной и экономии топлива в целом.

Показания температуры раствора с датчика на конце трубопроводов капиллярных трубок передавались по беспроводной связи на ПК, который находился в операторной. Система датчики/база/ПК передавала информацию о температуре каждые 15 минут, которая записывалась в ПК (рис. 6).

Блок 16-3					Блок 16-4				
	Temp	Averaged	Min	Max		Temp	Averaged	Min	Max
04:00	1.5	3.03	1.5	6.3	04:00	3.4	5.08	3.4	7.2
08:00	2.2								
12:00	3.9								
16:00	6.3								
20:00	2.2								
00:00	2.1								
Блок 16-19					Блок 16-20				
	Temp	Averaged	Min	Max		Temp	Averaged	Min	Max
04:00	3.2	4.37	3.2	6.7	04:00	5.9	6.3	5.6	7.5
08:00	3.9								
12:00	5.2								
16:00	6.7								
20:00	3.5								
00:00	3.7								
Блок 16-25									
	Temp	Averaged	Min	Max		Temp	Averaged	Min	Max
04:00	1.8	4.08	1.8	6.6					
08:00	2.5								
12:00	6.3								
16:00	6.6								
20:00	3.4								
00:00	3.9								
	Raff to the dumps flow	T before HEX	T, after HEX	Heating	Ambient temp	Wind chill			
04:00	789	7.94	17.06	9.12	-12	-17			
08:00	780	7.94	17.06	9.12	-12	-22			
12:00	780	8.07	14.45	6.38	-11	-18			
16:00	780	8.33	13.54	5.21	-11	-15			
20:00	788	8.2	15.36	7.16	-11	-12			
00:00	787	7.94	16.15	8.21	-14	-14			
	784	8.07	15.60	7.53	-11.75	-14.75			

Рисунок 6. Образец показаний температуры раствора с датчика

Анализ информации, полученной с датчиков температур, проводился каждые 4 часа:

- 1) минимальная/максимальная/средняя температура на промывочных задвижках;

2) температура окружающей среды/охлаждение под действием ветра (данные по температуре окружающей среды, температуры с учетом ветра и влажности, а также осадкам снимались с метеостанции Davis Vantage pro 2);

3) температура перед теплообменником/после него/нагрев.

В соответствии с этими данными оператор котельной производил регулирование подачи угля. Целевое поддержание минимальной температуры в точке сброса промывочных труб составляло +2 °С. На рис. 7 приведены тренды температур на концах капиллярных трубок по каждому зимнему блоку.

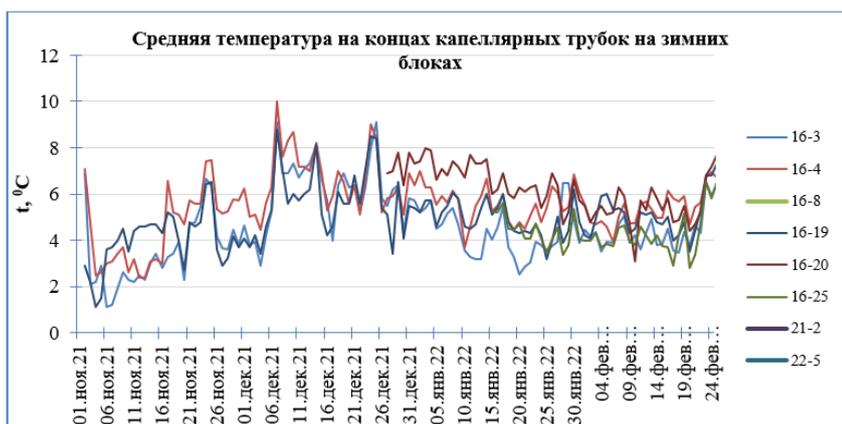


Рисунок 7. Тренды температур на концах капиллярных трубок на зимних блоках

Целевое поддержание минимальной температуры в точке сброса промывочных труб в +2 °С было выбрано эмпирически из-за возможности принятия своевременных мер и предотвращения замерзания в случае быстрого ухудшения погодных условий.

Несомненно, существует прямая зависимость между температурой охлаждения ветра и потерей тепла на блоках. Почти на каждый отрицательный «пик» падения температуры окружающей среды приходился «пик» нагревания рафината (рис. 8).

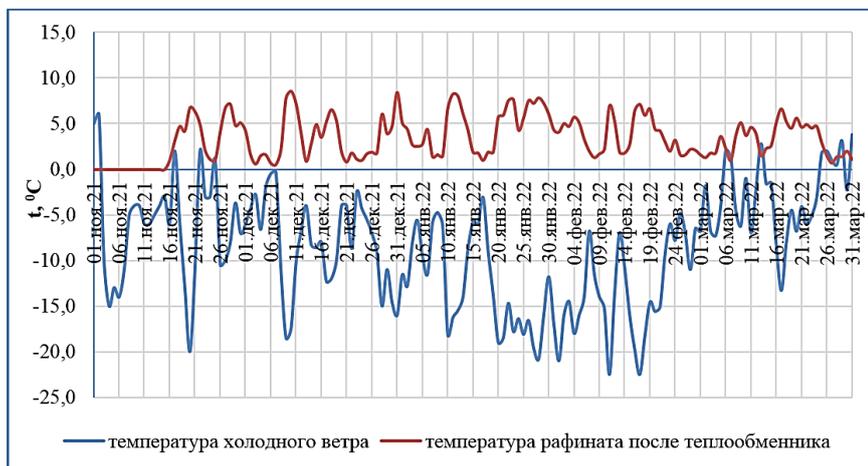


Рисунок 8. Зависимость температуры рафината от температуры окружающей среды. Фактической температурой, влияющей на замерзание капиллярных трубок, является

температура охлаждения ветра на поверхности отвала. В декабре 2021 года температура ветра была немного ниже, чем в предыдущую зиму 2020 года (рис. 9).

Средняя температура нагрева, измеренная на выходе теплообменника, за весь холодный период (ноябрь-февраль) на западной промышленной площадке составила + 3,5 °С.

В предыдущие годы температура рафината, подаваемого на отвал, поддерживалась на уровне 18-20 °С, так как температура на концах капиллярных трубок измерялась вручную и не часто. Используя температурные датчики и снимая показания каждые 15 минут, контроль температуры рафината проводился в более узком диапазоне.

В результате опытно-промышленных испытаний установлено, что рафинат на отвалы может безопасно подаваться при более низкой температуре – около 12 °С, обеспечивая устойчивый контроль по сравнению с предыдущей зимой (рис. 10).



Рисунок 9. Температура охлаждения ветра в зимний период 2020-2021 и 2021-2022 гг.

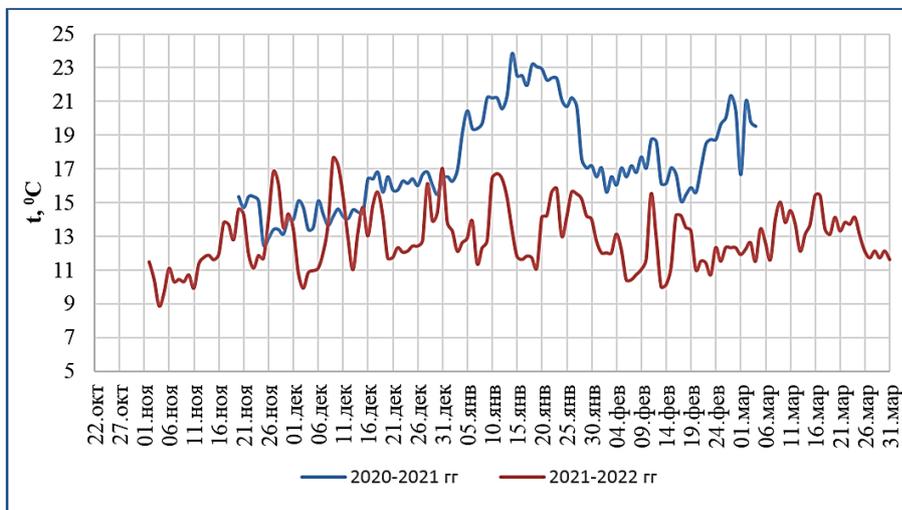


Рисунок 10. Сравнительная характеристика температуры рафината, подаваемого на отвалы в зимний период 2020-2021 и 2021-2022 гг.

Заключение. Система контроля температуры рафината, подаваемого на отвал, позволяет

обеспечить гибкость в работе при выщелачивании в сочетании с котельной – не происходит перегревания рафината и повышается безопасность от риска замерзания. Таким образом, предложенное технологическое решение продемонстрировало свою эффективность и будет использоваться в качестве стандартной практики в дальнейшем.

Техническим результатом используемой технологии является повышение эффективности процесса выщелачивания меди из техногенных минеральных образований Коунрадского рудника в период отрицательных температур за счет возможности теплофизического регулирования этого процесса в штабеле и повышения экологической безопасности.

Список литературы

1. Поморцева А.А., Карасев М.А., Поспехов Г.Б. Инженерно-геологическое обеспечение устойчивости штабеля кучного выщелачивания // *Успехи современного естествознания*. – 2021. – №1. – С. 63-69.
2. Ковалев В.Н. Совершенствование процесса кучного выщелачивания в условиях многолетней мерзлоты // *Горный журнал*. – 2017. – № 7. – С. 59–62.
3. Саидова М.С., Файзиева Д.К. Сернокислотное выщелачивание забалансовых медных руд // *Сборник статей IV Международной научно-практической конференции*. – Пенза: Наука и Просвещение, 2018. – С. 65-67.
4. Меретуков М. Г. Подземное выщелачивание медных руд // *Цветные металлы*. – 2018. – № 3. – С. 21-26.
5. Masloboev V., Seleznev S., Svetlov A., Makarov, D. Hydrometallurgical Processing of Low-Grade Sulfide Ore and Mine Waste in the Arctic Regions: Perspectives and Challenges // *Minerals*, 2018, 8(10) . – P. 436. – doi:10.3390/min8100436 (in Eng.).
6. Ilankoon I. M. S. K., Tang Y., Ghorbani Y., Northey S., Yellishetty M., Deng X., McBride D. The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry: Challenges and opportunities // *Minerals Engineering*, 2018, 125. – Pp. 206-222. – doi:10.1016/j.mineng.2018.06.006 (in Eng.).
7. Yin S., Wang L., Wu A., Free M. L., Kabwe E. Enhancement of copper recovery by acid leaching of high-mud copper oxides: A case study at Yangla Copper Mine, China // *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202. – Pp. 321–331. – doi:10.1016/j.jclepro.2018.08.122 (in Eng.).
8. Мязин В.П., Соколова Е.С., Арданаева С.А. Патентно-информационный анализ уровня развития технических решений по кучному выщелачиванию золота из техногенного сырья в криолитозоне // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. – 2020. – Т. 7. – № 2. – С. 101-106.
9. Минеев Г.Г., Васильев А.А., Никитенко А.Г. Кучное выщелачивание золотосодержащих руд // *Вестник ИрГТУ*. – 2017. – том 21. – № 4. – С. 147-156.
10. Thenepalli T., Chilakala R., Habte L., Tuan L. Q., Kim C. S. A Brief Note on the Heap Leaching Technologies for the Recovery of Valuable Metals // *Sustainability*, 2019, no. 11(12). – P. 3347. – doi:10.3390/su11123347 (in Eng.).
11. Van Staden P. J., Petersen, J. Towards fundamentally based heap leaching scale-up. *Minerals Engineering*, 2021, no. 168, p.106915. doi:10.1016/j.mineng.2021.106915 (in Eng.).
12. Saldaña M., Toro N., Castillo J., Hernández P., Navarra, A. Optimization of the Heap Leaching Process through Changes in Modes of Operation and Discrete Event Simulation, *Minerals*, 2019, no. 9(7). – P.421. – doi:10.3390/min9070421 (in Eng.).
13. Mellado, M., Cisternas, L., Lucay, F., Gálvez, E., Sepúlveda, F. A Posteriori Analysis of Analytical Models for Heap Leaching Using Uncertainty and Global Sensitivity Analyses, *Minerals*, 2018, no. 8(2). – P.44. – doi:10.3390/min8020044 (in Eng.).
14. Lizama H. M. How copper dump leaching works, *Minerals Engineering*, 2021, no. 171. – P.107075. – doi:10.1016/j.mineng.2021.107075 (in Eng.).
15. Полезная модель РК Способ кучного выщелачивания лежалых отвалов руд при отрицательных температурах (19) KZ (13) U (11) 4436 / Литвинов В.В., Айтекенова Д.А., Журавлев И.П.; заявл. 28.06.2019, опубл. 08.11.2019, бюл. №45

Дополнительная литература

16. Мязин В.П., Шестернев Д.М., Баянов А.Е. Техническое решение для реализации технологии круглогодичного кучного выщелачивания в условиях криолитозоны Забайкалья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – С. 99-106.
17. Ковалев Н.В., Ковалев В.Н., Холоднов В.А., Лебедева М.Ю. Математическая модель «сжимающееся ядро» для описания процесса выщелачивания золота из полифракционной руды // Вестник ТГТУ. – 2016. – Том 22. – № 4. – С. 565-580.

References

1. Pomorceva A.A., Karasev M.A., Pospekhov G.B. Inzhenerno-geologicheskoe obespechenie ustojchivosti shtabelya kuchnogo vyshchelachivaniya // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. – 2021. – № 1. – S. 63-69.
2. Kovalev V.N. Sovershenstvovanie processa kuchnogo vyshchelachivaniya v usloviyah mnogoletnej merzloty // Gornyj zhurnal. – 2017. – № 7. – S. 59-62.
3. Saidova M.S., Fajzieva D.K. Sernokislотноe vyshchelachivanie zabalansovyh mednyh rud // Sbornik statej IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2018. – S. 65-67.
4. Meretukov M. G. Podzemnoe vyshchelachivanie mednyh rud // Cvetnye metally. – 2018. – № 3. – S. 21-26.
5. Masloboev V., Seleznev S., Svetlov A., Makarov, D. Hydrometallurgical Processing of Low-Grade Sulfide Ore and Mine Waste in the Arctic Regions: Perspectives and Challenges // Minerals, 2018, 8(10). – P. 436. – doi:10.3390/min8100436 (in Eng.).
6. Ilankoon I. M. S. K., Tang Y., Ghorbani Y., Northey S., Yellishetty M., Deng X., McBride D. The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry: Challenges and opportunities // Minerals Engineering, 2018, 125. – Pp. 206-222. – doi:10.1016/j.mineng.2018.06.006 (in Eng.).
7. Yin S., Wang L., Wu A., Free M. L., Kabwe E. Enhancement of copper recovery by acid leaching of high-mud copper oxides: A case study at Yangla Copper Mine, China, Journal of Cleaner Production, 2018, 202. – P. 321–331. – doi:10.1016/j.jclepro.2018.08.122 (in Eng.).
8. Myazin V.P., Sokolova E.S., Ardanaeva S.A. Patentno-informacionnyj analiz urovnya razvitiya tekhnicheskikh reshenij po kuchnomu vyshchelachivaniyu zolota iz tekhnogenogo syr'ya v kriolitozone // Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornyh nauk. – 2020. – tom 7. – № 2. – S. 101-106.
9. Mineev G.G., Vasil'ev A.A., Nikitenko A.G. Kuchnoe vyshchelachivanie zolotosoderzhashchih rud // Vestnik IrGTU. – 2017. – tom 21. – № 4. – S. 147-156.
10. Thenepalli T., Chilakala R., Habte L., Tuan L. Q., Kim C. S. A Brief Note on the Heap Leaching Technologies for the Recovery of Valuable Metals, Sustainability, 2019, no. 11(12). – P. 3347. doi:10.3390/su11123347 (in Eng.).
11. Van Staden P. J., Petersen, J. Towards fundamentally based heap leaching scale-up // Minerals Engineering, 2021, no. 168. – P.106915. – doi:10.1016/j.mineng.2021.106915 (in Eng.).
12. Saldaña M., Toro N., Castillo J., Hernández P., Navarra, A. Optimization of the Heap Leaching Process through Changes in Modes of Operation and Discrete Event Simulation // Minerals. – 2019, no. 9(7). – P.421. – doi:10.3390/min9070421 (in Eng.).
13. Mellado, M., Cisternas, L., Lucay, F., Gálvez, E., Sepúlveda, F. A Posteriori Analysis of Analytical Models for Heap Leaching Using Uncertainty and Global Sensitivity Analyses // Minerals, 2018, no. 8(2). – P.44. – doi:10.3390/min8020044 (in Eng.).
14. Lizama H. M. How copper dump leaching works // Minerals Engineering. – 2021, no. 171. – P.107075. – doi:10.1016/j.mineng.2021.107075 (in Eng.).
15. Poleznaya model' RK Sposob kuchnogo vyshchelachivaniya lezhalyh otvalov rud pri otricate'nyh temperaturah (19) KZ (13) U (11) 4436 / Litvinov V.V., Ajtekenova D.A., ZHuravlev I.P.; zayavl. 28.06.2019, opubl. 08.11.2019, byul. №45

Additional literature

16. Myazin V.P., SHesternev D.M., Bayanov A.E. Tekhnicheskoe reshenie dlya realizacii tekhnologii

- kruglogodichnogo kuchnogo vyshchelachivaniya v usloviyah kriolitozony Zabajkal'ya // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal). – 2013. S.99-106.
17. Kovalev N.V., Kovalev V.N., Holodnov V.A., Lebedeva M.YU. Matematicheskaya model' «szhimayushcheesya yadro» dlya opisaniya processa vyshchelachivaniya zolota iz polifrakcionnoj rudy // Vestnik TGTU. – 2016. -Tom 22. – № 4. – S.565-580.