№9 (233) 2024

научно-технический и производственный

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ КАЗАХСТАНА

зарегистрирован Министерством культуры и информации Республики Казахстан 04.04.2013 г. Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания 13508-Ж.

Издается с января 2003 г.

Приказом **№290 от 26.06.2022 г.** Комитета по контролю в сфере образования и науки МОН РК внесен в перечень научных изданий, рекомендуемых для публикации основных результатов научной деятельности.

В журнале публикуются материалы, отражающие состояние и перспективы развития геологии, горного дела и металлургии не только в нашей стране, но и за рубежом. Журнал освещает проблемы охраны труда и техники безопасности, экономики, подготовки кадров и других вопросов, связанных с горно-металлургическим комплексом. В журнале представлены статьи прикладного характера, результаты фундаментальных исследований, служащие основой для новых технических разработок.

*При перепечатке материалов ссылка на **Горный журнал Казахстана** обязательна. Ответственность за достоверность сведений в публикуемых статьях и рекламных материалах несут авторы и рекламодатели. Мнение редакции не всегда может совпадать с мнением авторов.*

Адрес редакции:
050026, г. Алматы, ул. Карасай батыра, 146, оф. 401,
+7 (747) 343-15-02
minmag.kz

Представитель журнала на специализированных мероприятиях – Общество с ограниченной ответственностью «Маркетинг от Тимченко»

Представители журнала:

***Республика Узбекистан* –**
ШЕРЗОД ВАФО-ОГЛЫ КАРИМОВ
karimov20-13@mail.ru

***Российская Федерация, Москва* –**
ИРИНА ЯРОПОЛКОВНА ШВЕЦ
shvetsirina@yandex.ru

***Российская Федерация, Сибирский регион* –**
ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ ШАПОШНИК
shaposhnikyury@mail.ru

Периодичность 12 номеров в год

Тираж 1500 экземпляров

ISSN 2227-4766

Подписной индекс **75807** в каталогах:
АО «Казпочта»,
ТОО «Агентство «Евразия пресс»

Подписано в печать **30.09.2024 г.**

Отпечатано:
«Print House Gerona»
ул. Сатпаева 30А/3, офис 124
тел: + 7 727 250-47-40,
+ 7 727 398-94-59,
факс: + 7 727 250-47-39

© Горный журнал Казахстана 2003-2024

УЧРЕДИТЕЛЬ И СОБСТВЕННИК
ТОО «Научно-производственное предприятие «ИНТЕРРИН»

INTERRIN

Главный редактор
М.Ж. БИТИМБАЕВ, *mbitimbaev@mail.ru*

Заместитель гл. редактора
Л.А. КРУПНИК, *leonkr38@mail.ru*

Заместитель гл. редактора
Х.А. ЮСУПОВ, *yusupov_kh@mail.ru*

Ответственный редактор
Т.С. ДОЛИНА, *Tatyana.Dolina@interrin.kz*

Редакционная коллегия:

Fathi Habashi (Canada), Dr. techn. [Vienna], Dr.h.c. [St. Petersburg], Dr.h.c. [National Tech Univ, Lima], Dr.h.c. [San Marcos Univ, Lima]

Fidelis Tawiah Suorineni, PhD, Professor of Mining Engineering

М.Б. Барменшинова, канд. техн. наук, ассоц. профессор

А.А. Бекботаева, PhD, ассоц. профессор

В.А. Белин (Россия), д-р техн. наук, профессор

В.И. Бондаренко (Украина), д-р техн. наук, профессор

Н.С. Буктуков, д-р техн. наук, профессор

А.Е. Воробьев (Россия), д-р техн. наук, профессор

С.Ж. Галиев, д-р техн. наук, профессор

В.Ф. Демин, д-р техн. наук

А.И. Едильбаев, д-р техн. наук

Б.О. Жанибеков (Узбекистан), д-р философии геол.-мин. наук, доцент

Д.Р. Каплунов (Россия), д-р техн. наук, профессор

Ш.В. Каримов (Узбекистан), PhD

В.Л. Лось, д-р геол.-минерал. наук, профессор

С.К. Молдабаев, д-р техн. наук, профессор

У.Ф. Насиров (Узбекистан), д-р техн. наук, профессор

В.И. Нифадьев (Кыргызстан), д-р техн. наук, профессор

М.Б. Нурпеисова, д-р техн. наук, профессор

Е.Н. Ольшанский, член-корреспондент МАИН

Е.А. Петров (Россия), д-р техн. наук, профессор

Б.Т. Ратов, д-р техн. наук, профессор

К.Б. Рысбеков, канд. техн. наук, профессор

И.Н. Столповских, д-р техн. наук, профессор

П.Г. Тамбиев, канд. техн. наук

Ш.Н. Туробов (Узбекистан), PhD

О.Г. Хайитов (Узбекистан), д-р геол.-минерал. наук, профессор

Р.А. Хамидов (Узбекистан), PhD

А.Н. Шодиев (Узбекистан), д-р техн. наук

Т.А. Чепуштанова, PhD

Содержание

® – статья на правах рекламы
ⓘ – информационное сообщение
– статья публикуется в авторской редакции

3 **Колонка главного редактора**

5 **Здравствуй и с юбилеем тебя, наша любимая Alma-Mater!**

8 **Горно-металлургический институт им. О.А. Байконурова: прошлое и настоящее**

Геотехнология

15 **С.К. Молдабаев, Д.В. Бабец, К.Б. Рысбеков, А.Н. Нурманова*
Оценка влияния тектонических нарушений в донной части карьеров на безопасность извлечения запасов месторождения

Разрушение горных пород

22 **А.А. Орынбай, А.Е. Алибаев, Т.С. Ибырханов*
Рациональные параметры БВР, обеспечивающие наименьшие затраты на добычу и переработку руды

Металлургия

31 *Б.С. Баимбетов, Е.Б. Тажиев, *Г.Ж. Молдабаева, А.А. Даулетбакова*
К проблеме переработки отвальных шлаков медеплавильных заводов Казахстана

38 **T.A. Chepushtanova, S.B. Yulusov, J.M. Yespenova, A.S. Tulegenov*
Development of a process for the production of hard solid nanophers (Fe-Co) from complex black slate source

44 **А.С. Раимбекова, В.И. Капралова, Ш.Н. Кубекова, Л.А. Жусупова*
Исследование возможности переработки техногенных отходов месторождения Жайрем на растворы фосфатирования

Обогащение полезных ископаемых

51 *И.Ю. Мотовилов, *М.Б. Барменшинова, Ш.А. Телков, Р.С. Омар*
Изучение вещественного состава и оценка гравитационной обогатимости окисленных полиметаллических руд месторождения РК

Переработка полезных ископаемых

59 **А.С. Бейсебаева, С.М. Жарылкан, Е.Н. Есжан, С. Азат*
Методы переработки отходов горно-металлургического производства

Геоэкология

66 **Ы. Жакыпбек, А. Айдаркызы, Е.Е. Бегимжанова, Г.Б. Кезембаева*
Теміртау қаласының өнеркәсіптік ластануын қашықтықтан зондтау арқылы бағалау

71 *М.Б. Нұрпейісова*
Асылдар ұшқан, жасындар қонған тұғырымыз бұл

Код МРНТИ 53.01.91

Б.С. Баимбетов, Е.Б. Тажиев, *Г.Ж. Молдабаева, А.А. Даулетбакова
НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева»
(г. Алматы, Казахстан)

К ПРОБЛЕМЕ ПЕРЕРАБОТКИ ОТВАЛЬНЫХ ШЛАКОВ МЕДЕПЛАВИЛЬНЫХ ЗАВОДОВ КАЗАХСТАНА

Аннотация. Дана характеристика отвальным медным шлакам, рассчитан их рациональный состав. Для эффективной переработки подобных шлаков предложено применение процесса выщелачивания растворами серной кислоты, не требующего затрат тепловой энергии извне, вследствие экзотермичности протекающих реакций. Выполнен расчет термодинамических характеристик реакций, возможных при выщелачивании отвальных медных шлаков растворами серной кислоты. Проведен анализ фазового равновесия процесса выщелачивания шлака при различных расходах серной кислоты, оценено влияние температуры на изменение состава фаз, построены диаграммы фазового равновесия. Выполнены исследования по сернокислотному выщелачиванию отвальных медных шлаков при комнатной температуре и при 80 °С. Выявлены проблемы сгущения и фильтрования пульпы после выщелачивания, связанные с образованием кремниевой кислоты.
Ключевые слова: *медеплавильный шлак, серная кислота, выщелачивание, раствор, кек.*

Қазақстанның мыс балқыту зауыттарының үйінді шлактарын қайта өңдеу проблемасына

Аңдатпа. Үйінді мыс шлактарына сипаттама беріліп, олардың рационалды құрамы есептелді. Мұндай шлактарды тиімді өңдеу үшін жүретін реакциялардың экзотермиялық болуына байланысты жылу энергиясының сырттан шығынын қажет етпейтін күкірт қышқылының ерітінділерімен шаймалау процесін қолдану ұсынылады. Үйінді мыс шлактарын күкірт қышқылының ерітінділерімен шаймалау кезінде мүмкін болатын реакциялардың термодинамикалық көрсеткіштері есептелді. Күкірт қышқылының әр түрлі шығындарында шлакты шаймалау процесінің фазалық тепе-теңдігіне талдау жүргізіліп, температураның фазалар құрамының өзгеруіне әсері бағаланды, фазалық тепе-теңдік диаграммалары тұрғызылды. Үйінді мыс шлактарын бөлме және 80 °С температураларда күкірт қышқылымен шаймалау бойынша зерттеулер жүргізілді. Кремний қышқылының түзілуіне байланысты шаймалаудан кейін пульпаның қоюланып сүзуге кедергі жасайтыны анықталды.
Түйінді сөздер: *мыс балқыту шлактары, күкірт қышқылы, шаймалау, ерітінді, кек.*

To the problem of processing of waste slag from copper smelting plants in Kazakhstan

Abstract. The characteristic of dump copper slag is given, their rational composition is calculated. For the effective processing of such slags, it is proposed to use the leaching process with sulfuric acid solutions, which does not require the expenditure of heat energy from outside, due to the exothermicity of the ongoing reactions. Calculation of thermodynamic characteristics of reactions possible at leaching of waste copper slags with solutions of sulphuric acid is carried out. The phase equilibrium of the slag leaching process was analysed at different sulphuric acid flow rates and the influence of temperature on the change of phase composition was evaluated, phase equilibrium diagrams were constructed. Studies on sulfuric acid leaching of waste copper slag at room temperature and at 80 °C. Problems of pulp thickening and filtration after leaching associated with the formation of silicic acid have been identified.
Key words: *copper smelting slag, sulfuric acid, leaching, solution, undissolved residue.*

Введение

В настоящее время в старых отвалах всего мира накоплено десятки миллионов тонн шлаков черной и цветной металлургии, представляющих собой огромную ценность [1], причем шлаки, получаемые на предприятиях цветной металлургии, могут оказывать более негативное воздействие на окружающую среду по сравнению со шлаками черной металлургии. В связи с этим остро стоит проблема переработки шлаков с целью извлечения из них дополнительного количества ценных компонентов либо в случае ничтожного их содержания – с целью использования шлака в качестве строительного материала [2].

По своему составу шлаки медеплавильных предприятий весьма неоднородны и химически разнообразны из-за различий в исходном сырье, применяемых флюсующих добавок, аппаратурного оформления и температурных режимов процессов плавки [3]. Основными компонентами шлака являются кремнезем, оксиды железа, известняк и глинозем. Наряду с этим в медных шлаках в довольно высоких пределах содержатся такие ценные компоненты, как сама медь, никель, кобальт, цинк, свинец [4].

Существуют различные методы извлечения металлов из медных шлаков, при этом особое внимание уделяется флотации [5], гидрометаллургии [6], пирометаллургии [7-9], а также комбинированным методам, сочетающим в себе приемы как пиро-, так и гидрометаллургии [10].

С целью комплексного извлечения из шлаков кремнезема, железа и цветных металлов наиболее приемлемыми технологиями с точки зрения расхода энергии, текущих и капитальных затрат представляются гидрометаллургические процессы выщелачивания основных компонентов шлаков с выделением из растворов товарной продукции в виде кремнезема (белой сажи), железа в виде оксидов или гидратов и цветных металлов [11-12]. Кеки выщелачивания при малых содержаниях цветных металлов могут рассматриваться для применения в качестве строительных материалов. Разработка и внедрение технологий комплексной переработки шлаков позволит решить экологические проблемы накопленных шлаковых отвалов медеплавильных заводов.

Объект и методы исследования

Объектом исследования являлись отвальные медные шлаки, отобранные из шлаковых терриконов Иртышского медеплавильного завода представителями ТОО «East Minerals Resources» (таблица 1).

По стандартным методикам исследованы химический и рентгенофазовый анализ шлаков на основе химических и минералогических анализов, а также известных данных о строении металлургических шлаков для термодинамического моделирования процессов выщелачивания рассчитан их рациональный состав (таблица 2).

Содержание серы в отвальных шлаках процессов плавки в шахтных и отражательных печах составляет примерно 0,5-1,3%. Эта сера может быть связана в виде таких сульфидов, как борнит Cu_5FeS_4, халькозин Cu_2S, троилит FeS, сфалерит ZnS.

Таблица 1

Состав отвальных шлаков Иртышского медеплавильного завода

Кесте 1

Ертіс мыс балқыту зауытының үйінді шлактарының құрамы

Table 1

The composition of the waste slag of the Irtysh Copper smelter

Содержание, %												
SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	MnO	Σ	Cu	Pb	Zn
36,08	1,13	5,81	34,38	9,73	1,82	0,95	1,12	0,58	91,67	0,46	0,69	4,68

Таблица 2

Расчетный рациональный состав шлака

Кесте 2

Шлактың есептік рационалды құрамы

Table 2

Calculated rational composition of slag

Ед. изм.	$2FeO{\cdot}SiO_2$	Fe_3O_4	$2CaO{\cdot}SiO_2$	$2MgO{\cdot}SiO_2$	$Na_2O{\cdot}SiO_2$	$K_2O{\cdot}SiO_2$	$2ZnO{\cdot}SiO_2$
кг	42,2	1,674	14,94	2,825	1,933	1,833	7,972
кмоль	0,207	0,0072	0,087	0,026	0,0164	0,0119	0,0564
Ед. изм.	$2PbO{\cdot}SiO_2$	SiO_2	Al_2O_3	MnO	Cu_2S	FeS	ZnS	*Итого*
кг	0,843	13,492	5,81	0,58	0,621	0,343	0,381	95,447
кмоль	0,002	0,225	0,057	0,0225	0,0039	0,0039	0,0039	

Термодинамический анализ возможных реакций взаимодействия компонентов отвальных шлаков с серной кислотой проведен на основе расчетов термодинамических характеристик в лицензионной программе фирмы Outotec Technologies HSC Chemistry ver: 8.1.5. Для расчетов энергии Гиббса, энтальпии, энтропии и константы равновесия использовали модуль программы Reaction Equations. Термодинамическое моделирование фазовых равновесий проведено с учетом рентгенофазового анализа (РФА), с применением модуля программы Equilibrium Compositions.

При термодинамическом моделировании фазовых равновесий выщелачивания отвальных медных шлаков растворами серной кислоты учитывалось, что при выщелачивании шлаков растворами серной кислоты термодинамическая система включает такие фазы, как газ – раствор – твердое. В газовой фазе присутствуют кислород, азот, при взаимодействии сульфида железа с серной кислотой возможно образование сероводорода. В растворе присутствуют сульфаты металлов, серная кислота и вода. Твердый шлак в свою очередь содержит фазы, имеющие границы раздела, и эти фазы для термодинамического моделирования можно условно разделить на сульфиды, оксиды, силикаты, сульфаты.

Для расчета равновесного состава фаз при выщелачивании шлаков приняты исходные данные, приведенные в таблице 2. Активности компонентов рассматриваемой системы приняты равными единице. Равновесные составы фаз рассчитаны при увеличении расхода серной кислоты на каждом шаге на 0,05 кмоль, количество шагов 21.

Для подтверждения результатов термодинамического моделирования проведены опыты по сернокислотному выщелачиванию проб шлаков в лабораторной мешалке. Предварительные исследования по сернокислотному выщелачиванию проводились при комнатной температуре, показавшие, что в первые 10-15 минут происходит самопроизвольное повышение температуры пульпы от 20 °С до 50-60 °С за счет тепла экзотермических реакций. В связи с этим с целью сравнения показателей по выщелачиванию без подогрева дальнейшую серию опытов проводили при температуре выщелачивающего раствора 80 °С, достигаемой за счет тепла реакций и незначительного подогрева в термостате.

Результаты и их обсуждение

Расчеты термодинамических характеристик возможных реакций

В таблицах 3-4 приведена выборка термодинамических характеристик реакций, возможных при 20 °С.

Из основных силикатов, присутствующих в медных шлаках, термодинамическая вероятность протекания реакции с серной кислотой наиболее высока для силиката кальция и, в соответствии с изменением величины изменения энергии Гиббса, снижается от силиката кальция к силикату магния.

Следует отметить, что при выщелачивании отвальных медных шлаков происходит самопроизвольный разогрев реакционной смеси от комнатной температуры до 50-60 °С, что обусловлено значениями энтальпии реакций. Как было показано выше, в отвальных медных шлаках содержатся сульфиды металлов, вследствие чего при выщелачивании без окислителя возможно выделение токсичного сероводорода за счет реакций сульфидов с кислотой. Добавление окислителя (в частности пероксида водорода) устраняет выделение сероводорода и способствует образованию сульфатов металлов (таблица 4).

Таблица 3

Реакции взаимодействия компонентов шлака с серной кислотой и значения термодинамических характеристик при 20 °С

Кесте 3

Шлак компоненттерінің күкірт қышқылымен өзара әрекеттесу реакциялары және 20 °С температурадағы термодинамикалық сипаттамалардың мәні

Table 3

Reactions of the slag components with sulfuric acid and the values of thermodynamic characteristics at 20 °C

Реакция	ΔH, кДж	ΔS, Дж/моль·К	ΔG, кДж	K
Ca_2SiO_4(ж) + $2H_2SO_4$ = $2CaSO_4$ + H_2SiO_3 + H_2O	-432,248	-37,778	-421,173	1,129E+075
Pb_2SiO_4 + $2H_2SO_4$ = $2PbSO_4$ + H_2SiO_3 + H_2O	-308,352	0,986	-308,641	9,989E+054
Fe_2SiO_4 + $2H_2SO_4$ = $2FeSO_4$ + H_2SiO_3 + H_2O	-235,948	-8,119	-233,568	4,184E+041
Mg_2SiO_4 + $2H_2SO_4$ = $2MgSO_4$ + H_2SiO_3 + H_2O	-195,898	-21,158	-189,695	6,361E+033
Zn_2SiO_4 + $2H_2SO_4$ = $2ZnSO_4$ + H_2SiO_3 + H_2O	-169,964	-20,138	-164,061	1,720E+029
Na_2SiO_3 + H_2SO_4 = Na_2SO_4 + H_2SiO_3	-208,385	12,440	-212,032	6,079E+037

Таблица 4

Реакции взаимодействия оксидных и сульфидных составляющих шлака с H_2SO_4

Кесте 4

Шлактың тотықты және сульфидті компоненттерінің H_2SO_4 қышқылымен өзара әрекеттесу реакциялары

Table 4

Reactions of the oxide and sulfide components of slag with H_2SO_4

Реакция	ΔH, кДж	ΔS, Дж/моль·К	ΔG, кДж	K
$2Cu_2O$ + $4H_2SO_4$ + O_2(г) = $4CuSO_4$ + $4H_2O$	-631,700	-300,832	-543,511	7,131E+096
$Cu_2O{\cdot}Fe_2O_3$ + $4H_2SO_4$ = $2CuSO_4$ + $2FeSO_4$ + $4H_2O$	-261,869	-64,873	-242,851	1,887E+043
Cu_2S + $2,5O_2$(г) + H_2SO_4 = $2CuSO_4$ + H_2O	-931,262	-497,275	-785,486	9,395E+139
Cu_2S + H_2SO_4= Cu_2SO_4 + H_2S(г)	125,316	116,070	91,290	5,398E-017
Cu_5FeS_4+$4H_2SO_4$=$2Cu_2SO_4$+$CuSO_4$+$FeSO_4$+$4H_2S$(г)	342,872	395,728	226,864	3,742E-041
FeS+H_2SO_4=$FeSO_4$+H_2S(г)	-37,330	99,924	-66,623	7,449E+011
PbS + H_2SO_4 = $PbSO_4$ + H_2S(г)	-25,820	106,974	-57,179	1,546E+010
ZnS + H_2SO_4 = $ZnSO_4$ + H_2S(г)	16,566	101,293	-13,128	2,185E+002
FeS + $4H_2O_2$(ж) = $FeSO_4$ + $4H_2O$	-1210,669	-248,907	-1137,702	5,463E+202
PbS + $4H_2O_2$(ж) = $PbSO_4$ + $4H_2O$	-1199,159	-241,856	-1128,259	1,134E+201
ZnS + $4H_2O_2$(ж) = $ZnSO_4$ + $4H_2O$	-1156,773	-247,538	-1084,208	1,602E+193

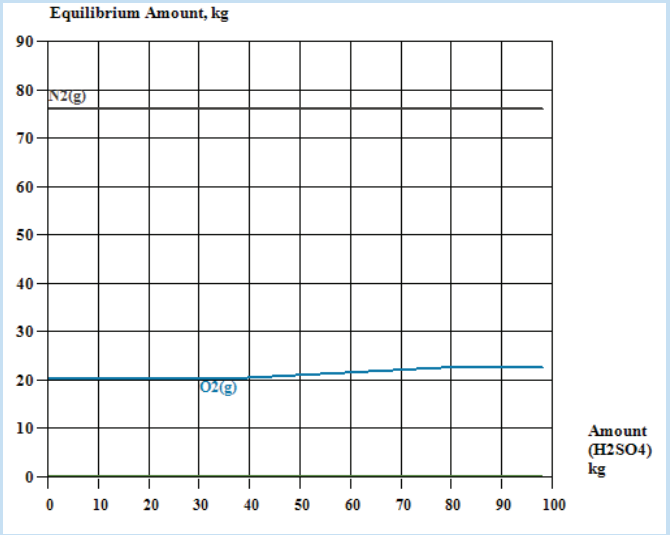
Результаты расчета равновесия выщелачивания шлака при 25 °С приведены на рисунках 1-3.

Из данных термодинамического моделирования, представленных на рис. 1а, видно, что с увеличением расхода кислоты на 100 кг шлака в газовой фазе несколько возрастает содержание кислорода. При расходе кислоты выше 40 кг на 100 кг шлака в газовой фазе появляется сероводород, содержание которого резко возрастает при расходе кислоты более 75 кг на 100 кг шлака (рис. 1б). Выделение сероводорода обусловлено реакциями взаимодействия сульфида железа и сульфида цинка с кислотой.

Из рис. 2 следует, что при выщелачивании отвальных медных шлаков растворами серной кислоты в равновесной системе при расходах кислоты до 35 кг на 100 кг шлака возрастает содержание кремнекислоты примерно от 33 до 48 кг. Содержание сульфатов щелочных металлов и сульфата магния возрастает при расходах кислоты от 0 до примерно 24 кг на 100 кг шлака, и для шлака принятого состава равновесное содержание сульфатов калия и магния составляет около 2 кг, для сульфата магния около 7 кг.

Сульфат цинка появляется в растворе при расходе кислоты более 20 кг, а сульфат железа при расходе кислоты более 34 кг на 100 кг шлака. При заданном расходе воды, кислоты и шлака равновесное содержание сульфата цинка составляет около 18 кг, сульфата железа около 67 кг. Избыток серной кислоты при выщелачивании достигается при расходе кислоты более 79 кг на 100 кг шлака. В раствор также переходит сульфат меди, однако из-за малого содержания меди в шлаке его содержание в растворе в виде сульфата $CuSO_4$ составляет примерно 0,49 кг.

Из кривых, приведенных на рис. 3, можно проследить изменение равновесного содержания компонентов в твердой фазе кека от выщелачивания. Содержание силиката кальция снижается при минимальных расходах кислоты



а) *б)*

Рис. 1. Кривые изменения равновесного состава газовой фазы системы шлак – H_2SO_4.
Сурет 1. Шлак – H_2SO_4 жүйесінің газ фазасының тепе-теңдік құрамының өзгеру қисықтары.
Figure 1. Curves of changes in the equilibrium composition of the gas phase of the slag – H_2SO_4 system.

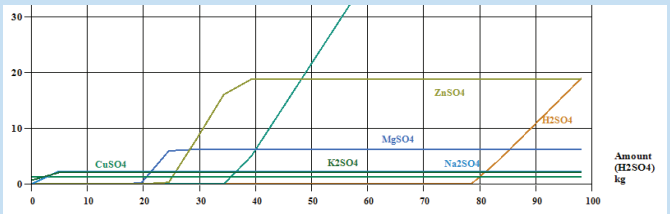


Рис. 2. Кривые изменения равновесного состава водной фазы системы шлак – H_2SO_4.
Сурет 2. Шлак – H_2SO_4 жүйесінің су фазасының тепе-теңдік құрамының өзгеру қисықтары.
Figure 2. Curves of changes in the equilibrium composition of the aqueous phase of the slag – H_2SO_4 system.

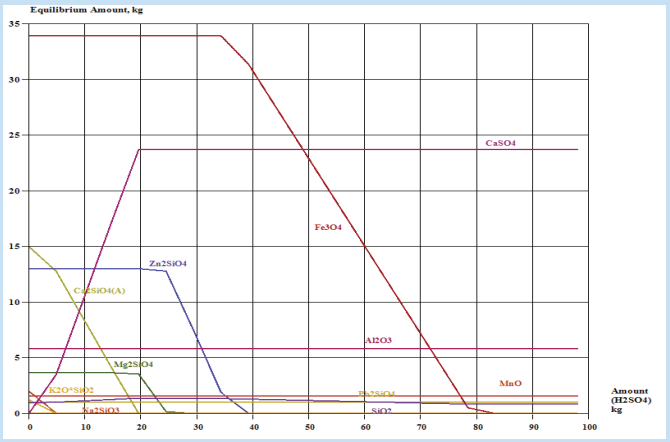


Рис. 3. Кривые изменения равновесного состава твердой фазы (кек) системы шлак – H_2SO_4.
Сурет 3. Шлак – H_2SO_4 жүйедегі қатты фазаның (кек) тепе-теңдік құрамының өзгеру қисықтары.
Figure 3. Curves of changes in the equilibrium composition of the solid phase (undissolved residue) of the slag – H_2SO_4 system.

до 20 кг на 100 кг шлака. В этом же интервале расходов кислоты разлагаются силикаты щелочных металлов и магния. Силикат цинка, свинца и железа выщелачивается при расходах кислоты более 25-35 кг на 100 кг шлака.

Моделирование равновесных составов газовой фазы, получаемых растворов и кеков при различных расходах серной кислоты и изменении температуры в интервале 25-100 °С, не выявило существенного влияния температуры на равновесие, но безусловно повышение температуры влияет на скорость выщелачивания. Как указывалось выше, энтальпия большинства реакций в изучаемой системе характеризуется значительными отрицательными величинами и за счет экзотермического тепла выщелачивание можно проводить без затрат внешней энергии.

Исследования по сернокислотному выщелачиванию пробы шлака проводили в лабораторной мешалке. Предварительно проведены исследования по выщелачиванию 100 гр измельченного шлака без подогрева раствором серной кислоты концентрацией 200 г/дм^3 и отношением Ж:Т = 4:1. Далее с целью сравнения показателей с выщелачиванием без подогрева, 100 грамм измельченного шлака выщелачивали при температуре 80 °С раствором серной кислоты концентрацией 132 г/дм^3 при отношении Ж:Т = 5:1.

В первом случае извлечение в раствор составило, примерно, %: 70 ***Fe,*** 76 ***Cu,*** 59 ***Zn,*** 56 ***SiO_2.*** При выщелачивании с подогревом степень извлечения металлов в раствор повысилась и составила, %: 92 ***Fe,*** 76 ***Cu,*** 93 ***Zn,*** 76 ***SiO_2.*** Следовательно, при сернокислотном выщелачивании основная часть железа, меди и цинка может быть переведена в раствор, однако в раствор переходит и значительная часть кремнезема из силикатов шлака. Значительное количество кремневой кислоты, образующейся в обоих случаях, затрудняет сгущение и фильтрацию пульпы и препятствует последующему выделению извлекаемых металлов (***Fe, Zn, Cu*** и др.) в товарные продукты и промпродукты, что требует в дальнейшем решения этой проблемы.

Заключение

Литературный и патентный обзор показывает, что для решения проблем переработки шлаковых отвалов медеплавильных заводов проводится большое количество исследований: предложены способы обогащения шлаков флотацией, пирометаллургические способы обеднения, гидрометаллургические технологии выщелачивания.

С целью комплексного извлечения из шлаков кремнезема, железа и цветных металлов наиболее приемлемыми технологиями с точки зрения расхода энергии, текущих и капитальных затрат представляются гидрометаллургические процессы выщелачивания шлаков с выделением из растворов товарной продукции в виде кремнезема (белой сажи), железа в виде оксидов или гидратов и цветных металлов. Кеки выщелачивания при малых содержаниях цветных металлов могут рассматриваться для применения в качестве строительных материалов.

Разработка и внедрение технологий комплексной переработки шлаков позволит решить экологические проблемы накопленных шлаковых отвалов медеплавильных заводов.

Приведены результаты термодинамического анализа и моделирования фазового равновесия процесса выщелачивания шлака растворами серной кислоты, проведены опыты по выщелачиванию шлака. Максимальная степень извлечения металлов в раствор составила, %: 92 ***Fe,*** 76 ***Cu,*** 93 ***Zn,*** 76 SiO_2 при температуре 80 °С, концентрации H_2SO_4, равной 132 г/дм^3 и отношении Ж:Т = 5:1

Выявлены проблемы сгущения и фильтрования пульпы после выщелачивания, связанные с образованием кремниевой кислоты и при низких значениях кислотности среды (pH = 1-3) выделениям гидроксида железа – $Fe(OH)_2$.

Благодарность

Исследования проводились в рамках программно-целевого финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан на 2023-2025 годы по программе №BR21881939 «Разработка ресурсосберегающих энергогенерирующих технологий для горно-металлургического комплекса и создание инновационно-инжинирингового центра» в НАО «КазНИТУ» им. К.И. Сатпаева на кафедре «Металлургия и обогащение полезных ископаемых».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Надин М. Пятак. Характеристики и экологические аспекты шлаков: обзор. / Надин М. Пятак, Майкл Б. Парсонс, Роберт Р. // Прикладная геохимия. 2015. Т. 57. С. 236-266 (на английском языке)*
2. *Кайджун Ши. Использование медных шлаков в производстве цемента и бетона. / Кайджун Ши, Кристиан Мейер, Али Бенуд.Ресурсы. // Охрана окружающей среды и вторичная переработка. 2008. Т. 52. Вып. 10. С. 1115-1120 (на английском языке)*
3. *Тина Чанда Фири. Потенциал использования медных шлаков в качестве ресурса для экономики замкнутого цикла: обзор – часть II. / Тина Чанда Фири, Притам Сингх, Александр Н. Николоски. // Разработка полезных ископаемых. 2021. Вып. 172. С. 107150 (на английском языке)*
4. *Митрашинович А.М. Возможность извлечения ценных и токсичных металлов из медного шлака с использованием железосодержащих добавок. / А.М. Митрашинович, Ю. Юанькунь, С. Стопич, М. Радосавлевич. // Металлы. 2023. Т. 13. С. 1467 (на английском языке)*
5. *Извлечение меди из плавильного шлака методом флотации. В книге «Применение принципов технологического проектирования в обработке материалов, энергетических и экологических технологиях». / Фань Дж., Ли Х., Вэй Л., Ли К., Сун С. Международное издательство «Шпрингер», 2017, 231-237 с. (на английском языке)*
6. *Ананд С. Выщелачивание медного конвертерного шлака под давлением с использованием разбавленной серной кислоты для извлечения кобальта, никеля и меди. / С. Ананд, Сарвешвара К. Рао, П.К. Йена. // Гидрометаллургия. 1983. Т. 10. Вып. 3. С. 305-312 (на английском языке)*
7. *Сарфо П. Карботермическое восстановление шлака медеплавильного завода для переработки в чугун и стекло. / П. Сарфо, Г. Висс, Г. Ма, А. Дас, С. Янг. // Разработка полезных ископаемых. 2017. Т. 107. С. 8-19 (на английском языке)*
8. *Эрденеболд У. Извлечение чугуна из медеплавильного шлака восстановительной плавкой. / У. Эрденеболд, Х.М. Чой, Дж.П. Ванг. // Архив металлургии и материалов, Варшава. 2018. Т. 63. Вып. 4. С. 1793-1798 (на английском языке)*
9. *Маткаримов С.Т. Исследование возможности получения железосодержащих сплавов из шлаков медного производства. / С.Т. Маткаримов, Б.Т. Бердияров, Ш.А. Мухаметджанова. // Цветные металлы. 2023. №9. С. 31-36 (на русском языке)*
10. *Арслан С. Извлечение меди, кобальта и цинка из медеплавильных и конвертерных шлаков. / С. Арслан, Ф. Арслан. // Гидрометаллургия. 2002. Т. 67. Вып. 1-3. С. 1-7 (на английском языке)*
11. *Банза А.Н. Извлечение цветных металлов из шлака медеплавильного завода путем окислительного выщелачивания и экстракции растворителем. / А.Н. Банза, Э. Гоц, К. Конголо. // Гидрометаллургия. Т. 67. Вып. 1-3. С. 63-69 (на английском языке)*

12. Урошевич Д.М. и др. Извлечение меди из медных шлаков и хвостов флотации медных шлаков окислительным выщелачиванием. // Физико-химические проблемы переработки полезных ископаемых. 2015. Т. 51. С. 73-82 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Надин М. Пятак. Шлактардың сипаттамалары мен экологиялық аспектілері: шолу. / Надин М. Пятак, Майкл Б. Парсонс, Роберт Р. Сил. // Қолданбалы геохимия. 2015. Т. 57. Б. 236-266 (ағылшын тілінде)
2. Кайджун Ши. Мыс шлактарын цемент пен бетон өндірісінде қолдану. / Кайджун Ши, Кристиан Мейер, Али Бенуд. // Ресурстар, қоршаған ортаны қорғау және қайта өңдеу. 2008. Т. 52. Шығ. 10. Б. 1115-1120 (ағылшын тілінде)
3. Тина Чанда Фири. Мыс шлактарының айналмалы экономика үшін ресурс ретіндегі әлеуеті: шолу – II-ші бөлім. / Тина Чанда Фири, Притам Сингх, Александр Н. Николоски. // Пайдалы қазбалар инженериясы. 2021. Т. 172. Б. 107150 (ағылшын тілінде)
4. Митрашинович А.М. Құрамында темір бар қоспаларды пайдалана отырып, мыс шлактарынан құнды және улы металдарды алу мүмкіндігі. / А.М. Митрашинович, Ю. Юанькунь, С. Стопич, М. Радосавлевич. // Металдар. 2023. Т. 13. Б. 1467 (ағылшын тілінде)
5. Флотация әдісімен балқыту шлактарынан мысты алу. «Материалдарды өңдеуде, энергетикалық және экологиялық технологияларда технологиялық жобалау принциптерін қолдану» кітабында. / Фань Дж., Ли Х., Вэй Л., Ли К., Сун С. «Шпрингер» халықаралық баспасы, 2017, 231-237 б. (ағылшын тілінде)
6. Ананд С. Кобальт, никель және мыс алу үшін сұйылтылған күкірт қышқылын пайдаланып, мысты конвертерлі шлакты қысыммен шаймалау. / С. Ананд, Сарвешвара К. Рао, П.К. Йена. // Гидрометаллургия. 1983. Т. 10. Шығ. 3. Б. 305-312 (ағылшын тілінде)
7. Сарфо П. Шойын мен әйнекке өңдеу үшін мыс балқыту зауытының шлактарын карботермиялық тотықсыздандыру. / П. Сарфо, Г. Висс, Г. Ма, А. Дас, С. Янг. // Пайдалы қазбалар инженериясы. 2017. Т. 107. Б. 8-19 (ағылшын тілінде)
8. Эрденеболд У. Тотықсыздандырып балқыту әдісімен мыс балқыту шлактырынан шойынды алу. / У. Эрденеболд, Х.М. Чой, Дж.П. Ванг. // Металлургия және материалдар мұрағаты, Варшава. 2018. Т. 63. Шығ. 4. Б. 1793-1798 (ағылшын тілінде)
9. Маткаримов С.Т. Мыс өндірісінің шлактарынан құрамында темір бар қорытпаларды алу мүмкіндігін зерттеу. / С.Т. Маткаримов, Б.Т. Бердияров, Ш.А. Мухаметджанова. // Түсті металдар. 2023. №9. Б. 31-36 (орыс тілінде)
10. Арслан С. Мыс балқыту және конвертерлі шлактардан мыс, кобальт және мырышты алу. / С. Арслан, Ф. Арслан. // Гидрометаллургия. 2002. Т. 67. Шығ. 1-3. Б. 1-7 (ағылшын тілінде)
11. Банза А.Н. Мыс балқыту зауытының шлактарынан түсті металдарды тотықтырып шаймалау және еріткішпен экстракциялау арқылы алу. / А.Н. Банза, Э. Гоц, К. Конголо. // Гидрометаллургия. 2002. Т. 67. Шығ. 1-3. Б. 63-69 (ағылшын тілінде)
12. Урошевич Д.М. және басқалары. Мыс шлактары мен мыс шлактары флотациясының қалдықтарынан мысты тотықтырып шаймалау арқылы алу. // Пайдалы қазбаларды өңдеудің физика-химиялық мәселелері. 2015. Т. 51. Б. 73-82 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Nadine M. Piatak. Characteristics and environmental aspects of slag: A review. / Nadine M. Piatak, Michael B. Parsons, Robert R. // Applied Geochemistry. 2015. Vol. 57. P. 236-266 (in English)
2. Caijun Shi. Utilization of copper slag in cement and concrete. / Caijun Shi, Christian Meyer, Ali Behnood. // Resources, Conservation and Recycling. 2008. Vol. 52. Issue 10. P. 1115-1120 (in English)
3. Tina Chanda Phiri. The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review – Part II. / Tina Chanda Phiri, Pritam Singh, Aleksandar N. Nikoloski. // Minerals Engineering. 2021. Vol. 172. P. 107150 (in English)
4. Mitrašinovi´c A.M. Feasibility of Recovering Valuable and Toxic Metals from Copper Slag Using Iron-Containing Additives. / Mitrašinovi´c A.M.; Yuankun Y.; Stopic S.; Radosavljevi´c M. // Metals. 2023. Vol. 13. P. 1467 (in English)
5. The Recovery of Copper from Smelting Slag by Flotation Process, In book: Applications of Process Engineering Principles in Materials Processing, Energy and Environmental Technologies. / Fan J., Li H., Wei L., Li C., Sun S. Springer International Publishing, 2017, 231-237 p. (in English)
6. Anand S. Pressure leaching of copper converter slag using dilute sulphuric acid for the extraction of cobalt, nickel and copper values. / Anand S., Sarveswara K. Rao, Jena P.K. // Hydrometallurgy. 1983. Vol. 10. Issue 3. P. 305-312 (in English)

7. *Sarfo P. Carbothermal reduction of copper smelter slag for recycling into pig iron and glass. / Sarfo P., Wyss G., Ma G., Das A., Young C. // Minerals Engineering. 2017. Vol. 107. P. 8-19 (in English)*
8. *Erdenebold U. Recovery of pig iron from copper smelting slag by reduction smelting. / Erdenebold U., Choi H.M., Wang J.P. // Archives of Metallurgy and Materials, Warsaw. 2018. Vol. 63. Issue 4. P. 1793-1798 (in English)*
9. *Matkarimov S.T. Issledovanie vozmozhnosti polucheniya zhelezosoderzhashchikh splavov iz shlakov mednogo proizvodstva. / S.T. Matkarimov, B.T. Berdiyarov, Sh.A. Mukhametdzhanova. // Tsvetnye metally. 2023. №9. S. 31-36 [Matkarimov S.T. Investigation of the possibility of obtaining iron-containing alloys from copper production slags. / Matkarimov S.T., Berdiyarov B.T., Mukhametdzhanova S.A. // Non-ferrous metals. 2023. №9. P. 31-36] (in Russian)*
10. *Arslan C. Recovery of copper, cobalt, and zinc from copper smelter and converter slags. / Arslan C., Arslan F. // Hydrometallurgy. 2002. Vol. 67. Issues 1-3. P. 1-7 (in English)*
11. *Banza A.N. Base metals recovery from copper smelter slag by oxidising leaching and solvent extraction. / Banza A.N., Gock E., Kongolo K. // Hydrometallurgy. 2002. Vol. 67. Issues 1-3. P. 63-69 (in English)*
12. *Urosevic D.M. et al. Recovery of copper from copper slag and copper slag flotation tailings by oxidative leaching. // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2015. Vol. 51. P. 73-82 (in English)*

Сведения об авторах:
Баимбетов Б.С., кандидат технических наук, профессор кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), *b.baimbetov@satbayev.university;* https://orcid.org/0000-0003-4442-5038
Тажиев Е.Б., доктор PhD, старший преподаватель кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), *y.tazhiyev@satbayev.university;* https://orcid.org/0000-0003-1955-8584
Молдабаева Г.Ж., кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), *gulnara.moldabayeva@satbayev.university;* https://orcid.org/0000-0002-3716-213X
Даулетбакова А.А., магистр технических наук, инженер кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), *a.dauletbakova@satbayev.university;* https://orcid.org/0000-0001-6220-6387

Авторлар туралы мәліметтер:
Баимбетов Б.С., техника ғылымдарының кандидаты, Қ.И. Сәтбаев атындағы «Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КЕАҚ «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының профессоры (Алматы қ., Қазақстан)
Тажиев Е.Б., PhD докторы, Қ.И. Сәтбаев атындағы «Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КЕАҚ «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының аға оқутышысы (Алматы қ., Қазақстан)
Молдабаева Г.Ж., техника ғылымдарының кандидаты, Қ.И. Сәтбаев атындағы «Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КЕАҚ «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Алматы қ., Қазақстан)
Даулетбакова А.А., техника ғылымдарының магистрі, Қ.И. Сәтбаев атындағы «Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КЕАҚ «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының инженері (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:
Baimbetov B.S., Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of «Metallurgy and Mineral Processing», Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev (Almaty, Kazakhstan)
Tazhiyev Ye.B., Doctor of PhD, Senior lecturer of the Department of «Metallurgy and Mineral Processing», Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev (Almaty, Kazakhstan)
Moldabayeva G.Zh., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Metallurgy and Mineral Processing», Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev (Almaty, Kazakhstan)
Dauletbakova A.A., Master of Technical Sciences, engineer of the Department of «Metallurgy and Mineral Processing», Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev (Almaty, Kazakhstan)