

ОПТИМИЗАЦИЯ ДОЗИРОВАНИЯ ФЛОТАЦИОННЫХ РЕАГЕНТОВ ПРИ ФЛОТАЦИИ РУД ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Т. А. Яковлева¹, А. О. Ромашев¹, Г. Н. Машевский²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия;

² Группа компаний «НОВОМЭК», Санкт-Петербург 199106, Россия

Аннотация: В настоящее время прогресс в области флотационного обогащения тесно связан с развитием измерительной техники, обеспечивающей формирование наиболее полного информационного пространства для изучаемого объекта, и применением новейших математико-статистических методов для анализа получаемых данных, являющихся основой цифровых технологий. В статье анализируется современный методологический подход к решению задачи оптимизации реагентных режимов флотации при исследовании на обогатимость минерального сырья. Данное исследование основывается на изучении электрохимических процессов, протекающих непосредственно во флотационной пульпе. В ходе лабораторных исследований было изучено многофункциональное действие сернистого натрия при флотации руд цветных металлов. Разработана и проверена нейросетевая модель, позволяющая оптимизировать показатели. Установлено, что при помощи оптимизации подачи сернистого натрия и стабилизации потенциала Ag₂S можно повысить технологические показатели обогащения.

Ключевые слова: флотация, коллективный сульфидный концентрат, сернистый натрий, медная руда, ионометрия, нейросетевое моделирование, контроль электрохимических параметров, цифровые технологии.

Благодарности: Работа выполнена в рамках гранта РФФ (проект № 19–17–00096).

Для цитирования: Яковлева Т. А., Ромашев А. О., Машевский Г. Н. Оптимизация дозирования флотационных реагентов при флотации руд цветных металлов с применением цифровых технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–2. – С. 175–188. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_175.

Digital technologies for optimizing the dosing of flotation reagents during flotation of non-ferrous metal ores

T. A. Yakovleva¹, A. O. Romashev¹, G. N. Mashevsky²

¹ Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia;

² NOVOMEK Group of Companies, Saint Petersburg 199106, Russia

Abstract: Currently, progress in the field of flotation enrichment is closely related to the development of measuring technology, which ensures the formation of the most complete information space for the object under study, and the use of the latest mathematical and

statistical methods for analyzing the data obtained, which are the basis of digital technologies. The article analyzes the modern methodological approach to solving the problem of optimization of reagent flotation modes in the study of mineral enrichment. This study is based on the study of electrochemical processes occurring directly in the flotation pulp. In the course of laboratory studies, the multifunctional effect of sodium sulfide in the flotation of non-ferrous metal ores was studied. A neural network model has been developed and tested to optimize the indicators. It is established that by optimizing the supply of sodium sulfide and stabilizing the potential of Ag₂S, it is possible to increase the technological indicators of enrichment.

Key words: flotation, collective sulfide concentrate, sodium sulfide, copper ore, ionometry, neural simulation, control of electrochemical parameters, digital technologies.

Acknowledgements: This research was funded by Russian Science Foundation (Project No. 19-17-00096).

For citation: Yakovleva T. A., Romashev A. O., Mashevsky G. N. Digital technologies for optimizing the dosing of flotation reagents during flotation of non-ferrous metal ores. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6-2):175–188. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_175.

Введение

Проблемой современного горного производства является существенное ухудшение рудной базы. Для поддержания рентабельности производства горнодобывающими компаниями постоянно ведется поиск новых методов оптимизации с целью устойчивого развития [1 – 3]. Целостный подход к решению проблем развития с учетом экологических, экономических и социальных аспектов вынуждает внедрять в технологические цепочки современные цифровые технологии и использовать передовые решения [4 – 7]. Основным обогатительным переделом является флотация. Флотация – комплексный, многофазный процесс, и труды многих исследований направлены именно на оптимизацию данных операций как ключевого звена обогатительной технологии.

Первая стадия флотационного объекта – процесс пульпоподготовки (контактирование пульпы с реагентами) – в наибольшей степени отражает физико-химическую сущность протекающих процессов в пульпе. Ионные равновесия в жидкой фазе пульпы и на поверхности минералов прежде всего формируют селектив-

ность процесса и достижение наилучших технологических показателей. И, тем не менее, в лабораторной и промышленной практике исследователи и операторы-технологи по-прежнему в основном используют параметр расхода реагентов в граммах на тонну, находя его потенциально оптимальное значение в результате предварительных лабораторных испытаний без применения средств оптимального планирования эксперимента. Этот принцип, к сожалению, используется при разработке технологий и сегодня и находит свое отражение в самых последних публикациях, без применения новейших методов прямой потенциометрии, обеспечивающих возможность понимания химизма процессов, протекающих в пульпе. На этой проблеме заостряют внимание и самые современные зарубежные публикации, отмечающие отсутствие сведений о глубоком понимании химизма процессов, протекающих во флотационных пульпах. Учитывая необходимость разработки технологий комплексного обогащения сырья, необходимы поиски новых подходов к исследованию на обогатимость.

При оптимизации флотации классическим подходом к исследованию

на обогатимость остается постановка многофакторного эксперимента с вариацией множества параметров. Обычно данные исследования ограничиваются во времени и средствах, а множество влияющих факторов не позволяют охватить все возможные аспекты, формируя ограниченное информационное поле параметров [8, 9]. Последние успехи в области измерительной техники и новейшие математико-статистические методы для анализа получаемых данных с помощью современных цифровых технологий позволяют расширить количество одновременно учитываемых факторов и производить многомерный анализ, с учетом различных воздействий [10, 11]. Одним из удобных инструментов для получения массива данных о процессе и анализа эффективности его протекания может быть потенциометрия [12]. Удобство данного метода заключается в его гибкости, точности при минимальных экономических затратах. На обогатительных фабриках дозировка и подача реагентов осуществляется автоматически по составленному регламенту или по команде оператора, при этом определяющим фактором является содержание полезного компонента. Использование потенциометрических методов позволяет производить дозировку, используя данные по остаточной концентрации реагентов. Таким образом может быть решен целый спектр технологических задач, связанных с дозировкой реагентов, что подтверждает актуальность данного исследования.

Таблица 1
Химический состав пробы
Chemical composition of the sample

Компонент	Cu	Fe	S	SiO ₂	Au	Ag
Содержание β, %	0,35	2,5	0,11	64,4	<0,02 г/т	2,75 г/т

Материалы и методы

Объектом исследования являлась проба медной руды Жезказганского месторождения (Карагандинская обл., Казахстан). Химическим анализом установлено, что на долю цветных металлов большая часть приходится на медь. В пробах медных руд количество вредных примесей сурьмы и мышьяка составляет тысячные доли процента. Содержание золота в пробе составляет сотые доли. В значительном количестве присутствуют CaO – 4,59%, Na₂O – 3,36%, K₂O – 1,85%, MgO – 1,55%. Химический состав представлен в табл. 1.

В первой части исследования было проведено пять опытов с различным временем измельчения 15–30 минут (выход класса минус 71 мкм. 76–90%) (рис. 1). Измельчение производилось как в безсодовой среде, так и при расходе Na₂CO₃, равном 1000 г/т. Расход Na₂S варьировался в диапазоне от 25 до 110 г/т, BtX 50–80 г/т.

При постановке данных опытов производился контроль электрохимических параметров исходной флотационной пульпы в лабораторной установке (рис. 2), состоящей из пневмомеханической флотомшины «Вэктис минералз» с мультисенсорной электрохимической системой EMF-16 Precision Electrochemistry Interface и ноутбука для обработки получаемой информации. Для проведения исследований по изучению электрохимических свойств исходного сырья применяется следующая номенклатура ионоселективных

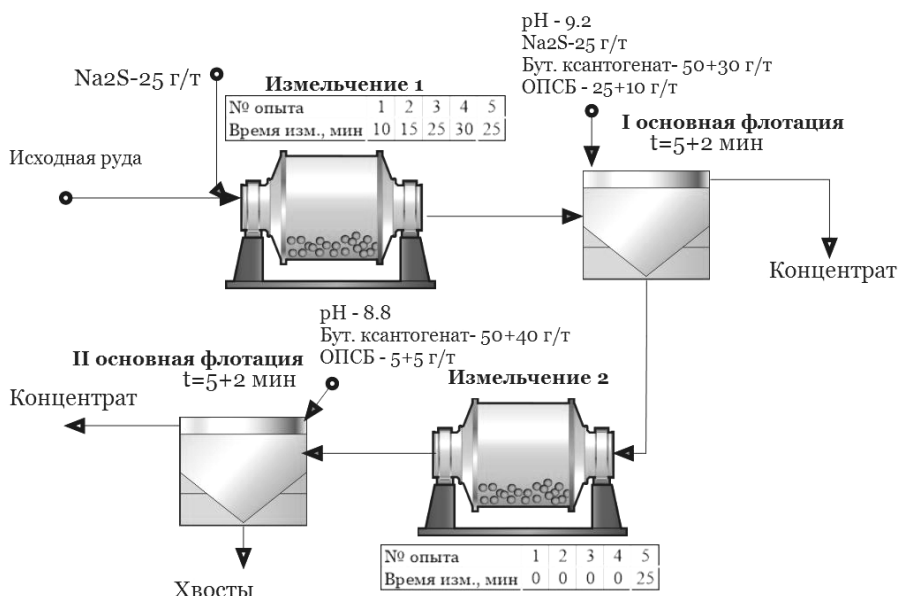


Рис. 1. Технологическая схема серии опытов на измельчаемость
 Fig. 1. Technological scheme of a series of experiments on grinding capacity



Рис. 2. Лабораторная установка контроля электрохимических параметров в флотомашине
 Fig. 2. Laboratory installation for monitoring electrochemical parameters in a flotation machine

сенсоров (электродов): рН-электрод (характеризует концентрацию водородных ионов в пульпе/воде); Мо-электрод (характеризует общий окислительно-восстановительный потенциал пуль-

пы); Ag₂S-электрод (имеет широкий диапазон измерения, в соответствии с рядом селективности: S²⁻ > CN⁻ > ДМДК > ВtX⁻ > Af⁻ > I⁻ > МТК⁻ > S₂O₃²⁻ > SCN⁻ > Cl⁻ > OH⁻ > CO₃²⁻ >

> $S_2O_4^{2-} \rightarrow SO_4^{2-}$); EM — мембранный электрод; Pt-электрод (электрод для определения окислительно-восстановительного потенциала измеряемой среды); Cd-электрод (характеризует электропроводность и ионную силу); Sn- и Ni-электрод (в качестве дополнительного Redox-электрода, при изучении возможности автоматического контроля используемых реагентов).

Флотация проводилась во флотационной камере объемом 3 литра. При перемешивании исходной пульпы фиксировались значения потенциалов перечисленных электродов. После стабилизации потенциалов фиксировалось исходное значение аргентитового электрода. В дальнейшем при помощи шприца дозатора производилось титрование Na_2S для достижения определения показателя. После установления данного потенциала продолжалось титрование, которое поддерживало данное значение (стабилизация).

В каждом опыте контролировалась кинетика изменения электродных потенциалов через одну секунду. По лабораторным опытам составлен массив данных, включающий 2910 наблюдений, усреднение проводилось по методу скользящей средней. Анализ содержания ценных компонентов осуществлялся методом рентгено-флуоресцентного анализа.

Результаты и обсуждение

Как известно, необходимость полного раскрытия минеральных компонентов существенно влияет на показатели обогащения [19]. В этой связи в первой части исследования было произведено исследование электрохимических свойств руд по отработанной типовой схеме (см. рис. 1).

В табл. 2 представлены результаты проведенных исследований.

По результатам проведенных флотационных опытов (табл. 2) при различ-

ном времени измельчения руды определено, что с повышением времени измельчения руды при одностадийной схеме эффективность обогащения по меди (критерий Ханкока–Луйкена) повышается с 64,93% до 81,62%. Как видно из результатов, увеличение времени измельчения свыше 25 минут не дает существенного прироста по извлечению (увеличение на 1,13%). Использование двухстадийного измельчения (25 мин+25 мин) позволило достигнуть значения эффективности в 87,54% (извлечение 93,08%).

Контроль электрохимических параметров пульпы во время исследования показал, что при перемешивании исходной пульпы основным отрицательным электрохимическим свойством представленной пробы является выщелачивание из неё катионов тяжелых металлов при исходной пульпоподготовке. По показаниям Ag_2S -электрода при изучении электрохимических параметров исходная пульпы содержит Cu^{2+} , наличие которого значительно повышает расход ксантогената. Осуществляемая дозировка Na_2S в этих опытах фиксирует очень низкую концентрацию в пульпе гидросульфидных анионов HS^- , не обеспечивающую нейтрализацию негативно влияющих ионов. Это отразилось на повышении окислительного потенциала пульпы, который приводит к интенсивному поглощению анионов собирателя. Таким образом, вопрос оптимизации дозировки сернистого натрия требует решения с помощью применения современных цифровых технологий.

На основании полученных данных было осуществлено нейросетевое моделирование объекта с помощью обобщенно-регрессионной нейронной сети. Выбор данной сети обусловлен необходимостью решения задач многофакторной регрессии. Для построения модели использовался модуль ST

Таблица 2

Результаты открытых флотационных опытов при разном времени измельчения
Results of open flotation experiments, at different grinding times

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %				Извлечение, %			
		Cu	Fe	S	SiO ₂	Cu	Fe	S	SiO ₂
Руда	100	0,35	2,57	0,22	64,44	100	100	100	100
Содержание класса –0,071 мкм – 52,0% (10 мин)									
Суммарный к-т	5,84	4,25	4,72	2,1	58,24	70,55	10,72	56,6	5,28
Хвосты II основной фл.	94,16	0,11	2,44	0,1	64,82	29,45	89,28	43,4	94,72
Содержание класса –0,071 мкм – 70,0% (15 мин)									
Суммарный к-т	8,58	3,51	4,76	1,59	60,2	84,6	15,98	62,34	8
Хвосты II основной фл.	91,42	0,06	2,35	0,09	64,97	15,4	84,02	37,66	92
Содержание класса –0,071 мкм – 86,0% (25 мин)									
Суммарный к-т	10,03	2,99	4,46	1,25	58,67	86,05	17,49	60,25	9,17
Хвосты II основной фл.	89,97	0,05	2,35	0,09	64,82	13,95	82,51	39,75	90,83
Содержание класса –0,071 мкм – 95,0% (30 мин)									
Суммарный к-т	13,63	2,37	4,48	1,11	59,67	87,18	22,99	68,72	12,68
Хвосты II основной фл.	86,37	0,06	2,37	0,08	64,87	12,82	77,01	31,28	87,32
Содержание класса –0,071 мкм – 99,0%, кл. –0,044 мкм – 92,0% (25+25 мин)									
Суммарный к-т	7,75	4,32	5,88	1,9	58,7	93,08	18,33	68,36	7,06
Хвосты II основной фл.	92,25	0,03	2,2	0,07	64,98	6,92	81,67	31,64	92,94

Neural Networks пакета Statistica 13.3. Входными функциями являются значения потенциалов следующих электродов: Pt; Ag; EM; Mo; Cd; Sn; Ni; pH, и времени стабилизации $t_{\text{стаб}}$ (в данном случае под временем стабилизации понимается время поддержания найденного значения потенциала путем титрования реагента в пульпу), выходными функциями является извлечение меди и ее содержание в концентрате.

В результате моделирования была отобрана сеть с архитектурой, включающей 9 входных значений и 2 выход-

ных, а также 4 слоя по 9, 1449, 3, 2 элементов соответственно (далее сеть ОРНС 9:9–1449–3-2:2 в соответствии с принятой схемой описания архитектуры в программе Statistica). Данная сеть показала лучшие значения производительности (т.е. отношение стандартных отклонений ошибки прогноза и наблюдаемых значений) и дала наименьшую ошибку в прогнозировании (стандартная ошибка по контрольной выборке 0,537, по тестовой 0,529) [23].

Статистические оценки модели доказывают ее высокую точность. В част-

ности, средние ошибки составили 0,005 и 0,082, коэффициенты корреляции 0,968 и 0,989 для содержания и извлечения меди соответственно. Стандартное отклонение ошибки моделирования не превышало 0,14 по содержанию Cu и 2,51 по извлечению Cu. Полученные данные свидетельствуют о весьма высокой связи (согласно шкале Чеддока) между исследуемыми параметрами, а полученная модель может быть использована в качестве цифровой модели процесса без постановки дополнительных опытов.

На основании полученных данных инициализирована функция отклика извлечения меди на значение потенциала Ag_2S электрода (рис. 3).

Анализ полученной зависимости показывает, что происходит плавный прирост извлечения меди в диапазоне потенциала Ag_2S от -60 до -600 . Скорость роста функции начинает замедляться в диапазоне от -400 до -500 .

Локальный максимум найденной аппроксимирующей функции достигается в точке -450 мВ. Как видно из рис. 3, дальнейшее уменьшение потенциала не влияет на извлечение, таким образом, дозировать реагенты рационально с учетом найденного целевого значения потенциала Ag_2S электрода.

Далее был произведен анализ чувствительности выходных функций к вариации входных переменных и их ранжирование (показывает, какие переменные делают наиболее важный вклад в нейросетевую модель). Данная процедура подразумевает поочередное исключение каждой переменной, как если бы она была недоступна для анализа. Общая ошибка сети с отключенной переменной делится на ошибку сети с включенной переменной, и полученное значение сравнивается с 1, соответственно, если значение больше 1, то переменная вно-

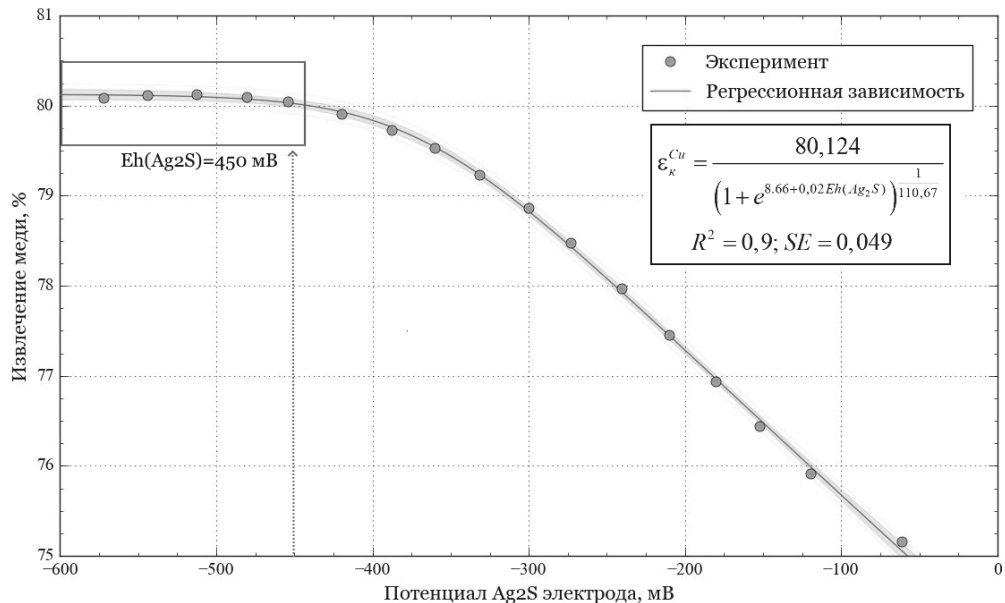


Рис. 3. Функция межпараметрической связи извлечения меди и значения потенциала Ag_2S электрода

Fig. 3. The function of the response of copper extraction to the variation of the potential of the Ag_2S electrode

сит вклад, если меньше либо равно 1, то переменная либо не влияет, либо ухудшает производительность сети, причём чем больше значение, тем больше вклад переменной. Результаты анализа показывают, что наименьший вклад вносят возмущения, влияющие на изменение потенциала электродов Pt, EM1, Mo (отношение в районе 1,050), а главную роль играют вариации времени стабилизации оптимального значения потенциала.

На вторым этапе исследования выявлялось время стабилизации пульпы при значении потенциала Ag_2S электрода на уровне минус 450 мВ, дающем наиболее высокое значение извлечения меди. В этих целях была составлена многофакторная матрица, обеспечивающая применение методологии нейросетевого моделирования. Данная методика была выбрана ввиду очевидных преимуществ перед факторным экспериментом, в частности, построение матрицы и реализация матрицы планирования с таким количеством переменных факторов потребовала бы большого количества опытов и временных затрат, методика применения нейросетевого моделирования позволяет получить достаточно точную регрессионную модель, ограничившись меньшим количеством исследований.

Для построения нейросетевой модели процесса дополнительно была проведена серия из десяти опытов с замерами потенциалов, где варьировался расход Na_2CO_3 от 0 г/т до 1000 г/т; время перемешивания исходной пульпы составляло от 2 до 6 минут [22]. Время стабилизации находилось в диапазоне от 2 до 4 минут; расход собирателя составил 20–50 г/т и расход вспенивателя составил 20–60 г/т. Входными функциями являлись значение следующих электродов: EM; Cd; pH, время измельчения, перемешивания и стаби-

лизации значений аргентитового электрода. Выходными функциями является извлечение меди и ее содержание в концентрате [20 – 23].

В результате нейросетевого моделирования при помощи обобщенно-регрессионной нейронной сети, имеющей 6 входных значений и 2 выходных, а также 4 слоя по 6, 4957, 3, 2 элементов соответственно (среднее ошибки 0,0865 и 0,126, коэффициенты корреляции 0,979 0,995 для содержания и извлечения меди соответственно) и анализа чувствительности было установлено, что все величины вносят весомое значение в модель (значение более 1), причем наибольшее значение на вариацию оказывает время стабилизации (отношение 3,421).

Смоделированные с помощью нейросети основные технологические показатели приведены в табл. 3.

В качестве критерия оптимальности на основании полученных данных был рассчитан комплексный показатель эффективности обогащения по критерию Ханкока–Луйкена:

$$E = \frac{\varepsilon_k - \gamma_k}{100 - \beta_{исх}} \cdot 100,$$

где $\beta_{исх}$ — содержание меди в исходном материале, %.

Расчетные данные и найденная регрессионная функция приведены на рис. 4. Приведенная на рисунке зависимость показала, что с увеличением времени стабилизации рост извлечения носит линейный характер до некой точки, а дальнейшее повышение времени приводит к снижению извлечения и эффективности обогащения, что объясняется передозировкой сернистого натрия и депрессией минералов меди.

Для выбора оптимального времени стабилизации найденная функциональная зависимость исследовалась симплексным методом. В результате

Таблица 3

Расчетные технологические показатели при различном времени стабилизации
Sensitivity analysis of output functions to variations in input variables

№ пп	$t_{\text{стаб}}$	Содержание $\beta_{\text{Кг}}$ %	Извлечение $\epsilon_{\text{Кг}}$ %	Выход $\gamma_{\text{Кг}}$ %
1	2,00	8,95	65,60	2,57
2	2,09	8,82	66,45	2,64
3	2,17	8,76	67,46	2,70
4	2,25	8,68	68,75	2,77
5	2,34	8,59	70,21	2,86
6	2,42	8,47	72,00	2,97
7	2,50	8,36	73,80	3,09
8	2,59	8,24	75,66	3,21
9	2,67	8,12	77,49	3,34
10	2,75	8,02	79,20	3,46
11	2,84	7,91	80,58	3,56
12	2,92	7,82	81,81	3,66
13	3,00	7,74	82,73	3,74
14	3,08	7,67	83,39	3,80
15	3,17	7,60	83,86	3,86
16	3,25	7,54	84,15	3,91
17	3,34	7,46	84,27	3,95
18	3,42	7,39	84,27	3,99
19	3,50	7,30	84,12	4,03
20	3,59	7,23	83,93	4,06
21	3,67	7,12	83,68	4,11
22	3,75	7,04	83,39	4,15
23	3,84	6,96	83,14	4,18
24	3,92	6,89	82,89	4,21
25	4,00	6,83	82,63	4,23

определено, что оптимальное время стабилизации заданного потенциала $Ag_2S = -450$ мВ должно составлять около 3,27 минут.

Заключение

Приведенные в данной работе исследования показывают богатые возможности применения современных методов цифровых технологий и потенциометрии с целью повышения эффективности переработки руд флотационным обогащением. Среди преимуществ данного метода следует отметить тот факт, что применение нейросетевого моделирования позволяет сократить время

при постановке флотационных опытов. Немаловажным является то, что подход не зависит от типа перерабатываемой руды и может быть адаптирован для различных типов руд для определения концентрации водородных ионов, циан-ионов, окислительно-восстановительного потенциала, сульфидных ионов и ионов ксантогената с использованием различных электродов. Учитывая преимущества данного подхода, можно рекомендовать данный метод для построения оптимальных исследований.

В результате проведенных лабораторных исследований с нейросетевым моделированием для исследуемой пробы

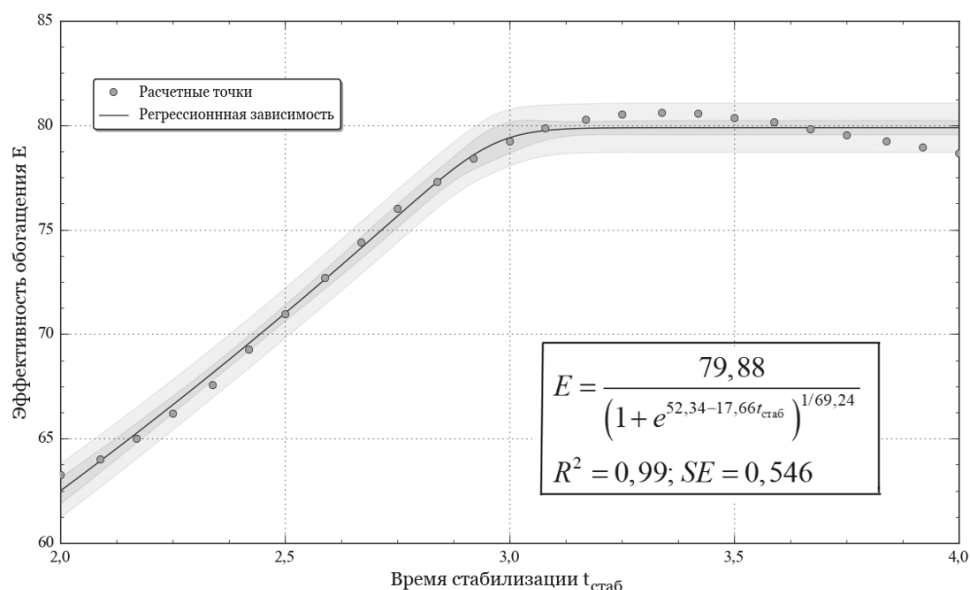


Рис. 4. Функции отклика эффективности обогащения на изменение значения времени стабилизации потенциала $\text{Ag}_2\text{S} = -450 \text{ мВ}$

Fig. 4. Beneficiation efficiency response functions to the change of $\text{Ag}_2\text{S} = -450 \text{ mV}$ stabilization time value

получены высокие технологические показатели извлечения меди за счет определения целевых значений и времени стабилизации потенциала электрода Ag_2S . Установлено и обосновано, что значение потенциала электрода Ag_2S должно находиться на уровне -450 мВ , при времени стабилизации заданного значения $3,27$ минут. В результате соблюдение полученных условий на данном типе сырья позволит достичь извлечения меди $\epsilon_{\text{Cu}} = 91\%$ при содержании меди в черновом концентрате около 14% .

Полученные показатели не являются максимально достижимыми, так как значения были установлены только для факторов, дающих наибольшее влияние на чувствительность выходных функций. При комплексном подходе по аналогичной методике можно провести оптимизацию всех параметров для достижения наилучших результатов. В промышленном масштабе про-

ведение такого рода исследований тоже не вызывает трудностей при снабжении необходимыми электродами камер флотомашин. Обработка полученных данных предоставит возможность в онлайн-режиме выдавать необходимые рекомендации по управлению оператору и позволит вести переработку с высокими показателями.

Вклад авторов

Ромашев А. О. — постановка задачи исследования; написание текста статьи, обработка данных исследования;


Яковлева Т.А — выполнение работы по систематизации материала; постановка опытов; анализ результатов исследования и подготовка данных;

Машевский Г.Н — генерация идеи исследования, консультирование по возникшим вопросам.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвиненко В. С., Цветков П. С., Двойников М. В., Буслаев Г. В. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики // Записки Горного института. — 2020. — № 244. — С. 428–438. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.5.
2. Бойко Н. А., Чвилева Т. А., Ромашева Н. В. Влияние деятельности угольных компаний на социально-экономическое развитие угледобывающих регионов и ее оценка // Уголь. — 2019. — № 11. — С. 48–53. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-11-48-53.
3. Dmitrieva D., Romasheva N. Sustainable development of oil and gas potential of the arctic and its shelf zone: The role of innovations // Journal of Marine Science and Engineering. 2020, no. 12 (8), pp. 1–18. DOI:10.3390/jmse8121003.
4. Элбэндари А. М., Александрова Т. Н., Николаева Н. В. Оптимизация реагентного режима при обогащении апатит-нефелиновых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 10. — С. 123–132. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-123-132.
5. Иваник С. А., Илюхин Д. А. Флотационное выделение элементарной серы из золотосодержащих кеков // Записки Горного института. — 2020. — Т. 242. — С. 202–208. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.202.
6. Арустамян А. М., Машевский Г. Н. Нейросетевая модель процесса флотации медно-молибденовых руд // Горная наука. Сборник научных трудов. Посвящен 25-летию юбилею Северо-Западного отделения АГН. СПб: ГЕОМЕХ, — 2019, — С. 174–185.
7. Александрова Т. Н., О'Коннор С. Переработка платинометаллических руд в России и Южной Африке: состояние и перспективы // Записки Горного института. — 2020. — Т. 244. — С. 462–473. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.9.
8. Napier-Munn T. J. Statistical methods for mineral engineers — How to design experiments and analyse data. Queensland, Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, — 2014. — 627 p.
9. Машевский Г. Н. Новые контуры теории и практики процесса флотационного обогащения // Горная наука. Сборник научных трудов. Посвящен 25-летию юбилею Северо-Западного отделения АГН. СПб: ГЕОМЕХ, — 2019, — С.136–160.
10. Aleksandrova T. N., Afanasova A. V., Aleksandrov A. V. Microwave Treatment to Reduce Refractoriness of Carbonic Concentrates // Journal of Mining Science. 2020, vol. 56, no. 1, pp. 136–141.
11. Nikolaeva N. V., Aleksandrova T. N., Chanturiya E. L., Afanasova A. V. Mineral and technological features of magnetite-hematite ores and their influence on the choice of processing technology // ACS Omega. 2021, vol. 6, no. 13, pp. 9077–9085. DOI:10.1021/acsomega.1c00129.
12. Бериашвили А. Т., Пикулина В. М. Новый подход к решению проблемы вариабельности извлечения меди на примере Жезказганского рудного поля // Обогащение руд. — 2018. — № 5. — С. 40–44.
13. Тутов Д. В. Использование геофизических методов для оценки технологических свойств руд колчеданно-полиметаллических месторождений // Известия Томского политехнического университета. — 2006. — Т. 309, № 4. — С. 40–47.
14. Duryagina202014. Duryagina A., Heide G., Talovina I., Bravo A. Mineralogical and morphometric aspects of the rock analysis as the basis for choosing a scheme for ore preparation // E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2020, vol. 192, 02023.
15. Foucaud Y., Filippova I. V., Filippov L. O. Investigation of the depressants involved in the selective flotation of scheelite from apatite, fluorite, and calcium silicates: Focus on the sodium silicate/sodium carbonate system // Powder Technology. 2019, vol. 352, pp. 501–512.

16. Zhang202016. *Zhang Q., Wen S., Feng Q., Zhang S.* Surface characterization of azurite modified with sodium sulfide and its response to flotation mechanism // *Separation and Purification Technology*. 2020. vol. 242, 116760. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116760.
17. Zhao201817. *Zhao Q., Liu W., Wei D., Wang W., Cui B., Liu W.* Effect of copper ions on the flotation separation of chalcopyrite and molybdenite using sodium sulfide as a depressant // *Minerals Engineering*. 2018. vol. 115, pp. 44–52.
18. *Balatovic M.* Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice. Flotation of Sulfide Ores. Elsevier. 2007. — 445 p. DOI:10.1016/B978-0-444-53029-5.X5009–6.
19. *Lieberwirth H., Popov O., Aleksandrova T., Nikolaeva N.* Scientific substantiation and practical realization of selective comminution process of polymetallic mineral raw materials // *E3S Web of Conferences*. 2020. vol. 192, no. 1, 02003 DOI: 10.1051/e3sconf/202019202003.
20. *Александрова Т. Н., Ушаков Е. К., Орлова А. В.* Метод типизации медно-цинковых руд сложного состава с применением нейросетевых моделей // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2020. — № 5. — С. 140–147. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-140-147.
21. *Nakhaei F., Mosavi M. R., Sam A., Vaghei Y.* Recovery and grade accurate prediction of pilot plant flotation column concentrate: Neural network and statistical techniques // *International Journal of Mineral Processing*. 2012. vol. 110–111, pp. 140–154. DOI: 10.1016/j.minpro.2012.03.003.
22. *Koteleva N., Kuznetsov V., Vasilyeva, N.* Simulator for Educating the Digital Technologies Skills in Industry. Part One. Dynamic Simulation of Technological Processes // *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 22, 10885. DOI:10.3390/app112210885.
3. *Машевский Г. Н., Ушаков Е. К., Яковлева Т. А.* Цифровая технология оптимизации дозирования сернистого натрия при флотации медной руды // *Обогащение руд*. — 2021. — № 3. — С. 18–33. DOI: 10.17580/or.2021.03.04. 

REFERENCES

1. Litvinenko V. S., Tsvetkov P. S., Dvoynikov M. V., Buslaev G. V. Barriers to implementation of hydrogen initiatives in the context of global energy sustainable development. *Journal of Mining Institute*. 2020. no. 244, pp. 428–438. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.5.
2. Boyko N. A., Chvileva T. A., Romasheva N. V. The impact of coal companies on the socio-economic development of coal mining regions and its assessment. *Ugol*. 2019. no. 11, pp. 48–53. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-11-48-53.
3. Dmitrieva D., Romasheva N. Sustainable development of oil and gas potential of the arctic and its shelf zone: The role of innovations. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020, no. 12 (8), pp. 1–18. DOI:10.3390/jmse8121003.
4. Elbendary A. M., Aleksandrova T. N., Nikolaeva N. V. Optimizing reagent regime in apatite–nepheline ore processing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 10, pp. 123–132. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-123-132.
5. Ivanik S. A., Ilyukhin D. A. Flotation extraction of elemental sulfur from gold-bearing cakes. *Journal of Mining Institute*. 2020, no. 244, pp. 202–208. [In Russ] DOI: 10.31897/PMI.2020.2.202.
6. Arustamjan A. M., Mashevskij G. N. Neural network model of flotation process of copper-molybdenum ores. *Mining Science. Collection of scientific works. Dedicated to the 25th anniversary of the North-West Branch AGN*. SPb: GEOMEH. 2019. pp. 174–185. [In Russ].
7. Aleksandrova T. N., O'Connor C. Processing of platinum group metal ores in Russia and South Africa: current state and prospects. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 244, pp. 462–473. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.9.

8. Napier-Munn T. J. Statistical methods for mineral engineers – How to design experiments and analyse data. Queensland, Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre. 2014, 627 p.
9. Mashevskiy G. N. New contours of the theory and practice of the flotation enrichment process. *Collection of scientific works. Dedicated to the 25th anniversary of the North-West Branch AGN*. SPb: GEOMEH. 2019, pp. 136–160. [In Russ].
10. Aleksandrova T. N., Afanasova A. V., Aleksandrov A. V. Microwave Treatment to Reduce Refractoriness of Carbonic Concentrates. *Journal of Mining Science*. 2020, vol. 56, no. 1, pp. 136–141.
11. Nikolaeva N. V., Aleksandrova T. N., Chanturiya E. L., Afanasova A. V. Mineral and technological features of magnetite-hematite ores and their influence on the choice of processing technology. *ACS Omega*. 2021, vol. 6, no. 13, pp. 9077–9085. DOI:10.1021/acsomega.1c00129.
12. Beriashvili A. T., Pikulina V. M. A new approach to solving the variability of copper recovery by the example of Zhezkazgan ore field. *Obogashchenie Rud*. 2018, no. 5, pp. 40–44. [In Russ].
13. Titov D. V. The use of geophysical methods to assess the technological properties of ores of the pyrite-polymetallic deposits. *Proceedings of the Tomsk Polytechnic University*. 2006. vol. 4, no. 309, pp. 40–47. [In Russ].
14. Duryagina202014. Duryagina A., Heide G., Talovina I., Bravo A. Mineralogical and morphometric aspects of the rock analysis as the basis for choosing a scheme for ore preparation. *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*. 2020, vol. 192, 02023.
15. Foucaud Y., Filippova I. V., Filippov L. O. Investigation of the depressants involved in the selective flotation of scheelite from apatite, fluorite, and calcium silicates: Focus on the sodium silicate/sodium carbonate system. *Powder Technology*. 2019, vol. 352, pp. 501–512.
16. Zhang202016. Zhang Q., Wen S., Feng Q., Zhang S. Surface characterization of azurite modified with sodium sulfide and its response to flotation mechanism. *Separation and Purification Technology*. 2020, vol. 242, 116760. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116760.
17. Zhao201817. Zhao Q., Liu W., Wei D., Wang W., Cui B., Liu W. Effect of copper ions on the flotation separation of chalcopyrite and molybdenite using sodium sulfide as a depressant. *Minerals Engineering*. 2018. vol. 115, pp. 44–52.
18. Balatovic M. Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice. Flotation of Sulfide Ores. Elsevier. 2007. 445 p. DOI:10.1016/B978-0-444-53029-5.X5009-6.
19. Lieberwirth H., Popov O., Aleksandrova T., Nikolaeva N. Scientific substantiation and practical realization of selective comminution process of polymetallic mineral raw materials. *E3S Web of Conferences*. 2020. vol. 192, no. 1, 02003. DOI: 10.1051/e3sconf/202019202003.
20. Aleksandrova T. N., Ushakov E. K., Orlova A. V. Method of complex copper–zinc ore typification using neural network models. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2020, no. 5, pp. 140–147. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-140-147.
21. Nakhaei F., Mosavi M. R., Sam A., Vaghei Y. Recovery and grade accurate prediction of pilot plant flotation column concentrate: Neural network and statistical techniques. *International Journal of Mineral Processing*. 2012, vol. 110–111, pp. 140–154. DOI: 10.1016/j.minpro.2012.03.003.
22. Koteleva N., Kuznetsov V., Vasilyeva, N. Simulator for Educating the Digital Technologies Skills in Industry. Part One. Dynamic Simulation of Technological Processes. *Applied Sciences*. 2021, vol 11, no. 22, 10885. DOI:10.3390/app112210885.
23. Mashevskiy G. N., Ushakov E. K., Yakovleva T. A. Digital technology for optimizing the sodium sulphide dosage during copper ore flotation. *Obogashchenie Rud*. 2021, no. 3, pp. 18–33. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.03.04.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ромашев А. О. — канд. техн. наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых, Санкт-Петербургский горный университет, <https://orcid.org/0000-0003-3210-8000>, 199106,

Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, Россия,
e-mail: romashev_ao@pers.spmi.ru;

Яковлева Т. А. — аспирант кафедры обогащения полезных ископаемых, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, Россия,

e-mail: iakovvleva@gmail.com;

Машевский Г. Н. — докт. техн. наук, главный технолог, Группа компаний «НОВОМЭК», Санкт-Петербург 199106, Россия,
e-mail: gennadii.mashevskii@novomek.ru.

Для контактов: *Яковлева Татьяна Александровна*, e-mail: iakovvleva@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Romashev A. O., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Minerals Processing Department, Saint Petersburg Mining University, <https://orcid.org/0000-0003-3210-8000>, 199106,

St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2, Russia,

e-mail: romashev_ao@pers.spmi.ru;

Iakovleva T. A., PhD student of the Minerals Processing Department, Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2, Russia, e-mail: iakovvleva@gmail.com;

Mashevsky G. N., Dr. Sci. (Eng.), Chief Technologist, NOVOMEK Group of Companies, St. Petersburg 199106, Russia,

e-mail: gennadii.mashevskii@novomek.ru.

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 21.04.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 21.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.

