

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.213.63:54-414:66.081

Бывальцев А.В.

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РАСХОДА РЕАГЕНТОВ-ПОДАВИТЕЛЕЙ СОРБЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЦИАНИРОВАНИЯ УГЛИСТОГО ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Аннотация. Цель – разработка методики подбора оптимального расхода реагентов-подавителей сорбционной активности углистого сырья при цианировании, учитывающей их влияние как на природные углистые компоненты, так и на искусственный сорбент. Проблема заключается в том, что реагенты-подавители, как правило, одновременно ухудшают сорбционную способность сорбента, что требует точного контроля их дозировки. Эксперименты проведены на флотоконцентрате с содержанием золота в цианируемой форме 31,75 г/т при варьировании расхода керосина в пределах 0-2 кг/т и загрузки активного угля, что позволило определить изотермы сорбции золота углем и твёрдой фазой пульпы, а также величину сорбционной активности. Предлагаемая методика позволила установить, что добавка керосина 0,5-2,0 кг/т снижает сорбционную активность флотоконцентрата с 88,4 до 52,2-79,8%, но избыток реагента ухудшает работоспособность активного угля. Ключевой показатель – отношение коэффициентов изотерм Фрейндлиха для активного угля (K_1) и для твёрдой фазы (K_2), достигает максимума на уровне 489 при расходе керосина 1,0 кг/т. Этот показатель отражает средний коэффициент распределения золота между активным углем и твёрдой фазой пульпы. Дальнейшее увеличение дозировки керосина снижает K_1/K_2 из-за «отравления» активного угля. Методика демонстрирует, что оптимальный расход реагента-подавителя соответствует пику K_1/K_2 , где подавление сорбционной активности сырья максимально, а негативное влияние на уголь минимально. Полученные результаты могут быть применены для других реагентов-подавителей, таких как дизельное топливо или поверхностно-активные вещества. Рекомендуется использовать данный подход при подборе расхода реагентов-подавителей как для исследовательских, так и для производственных целей.

Ключевые слова: сорбционная активность, органический углерод, золото, реагенты-подавители, цианирование, сорбент

Введение

Как известно, многие химические вещества находят применение для подавления сорбционной активности (СА) углисто содержащего сырья перед стадией цианирования [1-8]. В качестве реагентов могут применяться: горюче-смазочные материалы, неорганические и органические поверхностно-активные вещества, окислители, биореагенты [9-14]. При использовании искусственных сорбентов в сочетании с вышеуказанными реагентами-подавителями зачастую возникают негативные эффекты снижения их сорбционной способности, при этом отказаться от использования сорбента нельзя, так как для сорбционно-активного сырья обязателен режим сорбционного цианирования [15-22]. Например, ионообменные смолы и активные угли теряют механическую прочность в присутствии сильных окислителей, кроме того, активные угли уязвимы к отравлению органическими веществами, последующее удаление которых возможно лишь за счёт термической реактивации при 600-650°C.

В ряде случаев, в частности для активного угля, достаточно легко провести одновременный учёт влияния реагента-подавителя на СА твёрдой фазы и эффективность работы искусственного сорбента. Предлагается использовать методику, в которой учитывается одновременное положительное действие реаген-

та-подавителя на твёрдую фазу и побочное отрицательное действие на искусственный сорбент. Для этого проводится несколько серий опытов, отличающихся добавкой сорбента и расходом реагента-подавителя. Данная методика подбора расхода реагентов-подавителей характеризуется достоверными и корректными результатами.

Цель исследования – разработка методики подбора расхода реагентов-подавителей сорбционной активности упорного золотосодержащего сырья с учётом их влияния на искусственный сорбент.

Материалы и методы исследования

Исследования проведены на примере одного из флотоконцентратов, изученных в «Иргиредмете». Содержание Au в концентрате – 35,8 г/т, из них в цианируемой форме – 31,75 г/т, твёрдая фаза проявляет высокую СА на уровне 88,4% (по методике «Иргиредмета») из-за присутствия органического углерода в количестве 1,92 %. Предварительные тесты по подбору реагентов-подавителей для подавления СА перед стадией цианирования показали, что флотоконцентрат наиболее восприимчив к действию керосина.

Проводили 5 серий опытов по 6 опытов в каждой серии, всего 30 опытов. Навеска материала в каждом опыте составляла 0,30 кг. Предварительно проводили обработку пульпы эмульсией керосина. Условия цианирования в каждом из проведённых опытов (отношение Ж:Т – 1,2:1; концентрация NaCN – 2 г/л; pH –

11) соответствовали оптимальным условиям цианирования концентрата. Опыты в каждой серии отличались загрузкой свежего активного угля, которая составляла 0; 0,50; 1,00; 2,00; 5,00 и 10,0 г, серии между собой отличались расходом керосина. С целью достижения активным углем эффективного равновесия продолжительность цианирования составляла 72 ч.

После агитации уголь отделяли от пульпы, промывали водой, сушили и сдавали на анализ золота (атомно-абсорбционный анализ растворов после химического разложения угля). Пульпу фильтровали, фильтраты сдавали на атомно-абсорбционный анализ золота. Результаты опытов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Изотермы сорбции золота активным углем и твёрдой фазой пульпы, полученные в условиях цианирования флотоконцентрата

Номер опыта	Экспериментальные данные			Расчётные данные				
	$m_{\text{угля}}, \text{ г}$	$C_{\text{жидк}}, \text{ мг/л}$	$E_{\text{угля}}, \text{ г/т}$	СА, %	$C_{\text{тв. сорб.}}, \text{ г/т}$	K_1 изотермы Фрейндлиха для угля	K_2 изотермы Фрейндлиха для твёрдой фазы	K_1 / K_2
Серия №1 – без предварительной обработки керосином								
1	10,0	0,046	900	88,4	1,70	3315	15,95	208
2	5,00	0,13	1630		4,43			
3	2,00	0,39	2400		15,30			
4	1,00	1,14	3400		19,19			
5	0,50	2,27	4480		21,64			
6	Без угля	3,16	Без угля		28,06			
Серия №2 – с предварительной обработкой керосином 0,5 кг/т								
7	10,0	0,064	930	79,8	0,68	3817	10,59	360
8	5,00	0,14	1600		4,92			
9	2,00	0,50	3040		10,90			
10	1,00	1,38	4,80		15,54			
11	0,50	2,77	5860		18,75			
12	Без угля	5,51	Без угля		25,32			
Серия №3 – с предварительной обработкой керосином 1,0 кг/т								
13	10,0	0,083	920	72,8	0,99	3910	7,99	489
14	5,00	0,16	1620		4,56			
15	2,00	0,74	3380		8,35			
16	1,00	1,85	5640		10,79			
17	0,50	3,19	6900		16,53			
18	Без угля	7,4	Без угля		23,12			
Серия №4 – предварительной обработкой керосином 1,5 кг/т								
19	10,0	0,12	880	61,8	2,28	2626	6,21	423
20	5,00	0,24	1700		3,14			
21	2,00	1,97	3300		7,45			
22	1,00	3,13	4730		12,33			
23	0,50	6,5	5700		14,67			
24	Без угля	10,4	Без угля		19,62			
Серия №5 – с предварительной обработкой керосином 2,0 кг/т								
25	10,0	0,21	890	52,2	1,84	1723	4,75	363
26	5,00	1,00	1450		6,42			
27	2,00	2,86	3020		8,28			
28	1,00	5,7	4260		10,90			
29	0,50	9,8	4700		12,48			
30	Без угля	13,0	Без угля		16,58			

Примечание. Условия опытов: содержание Au в исходном концентрате – 35,80 г/т, из них в цианируемой форме – 31,75 г/т; масса концентрата в каждом опыте – 0,30 кг; объём жидкой фазы – 0,35 л; предварительная обработка питания цианирования эмульсией керосина в течение 16 ч, затем цианирование в течение 72 ч при pH – 11 и концентрации NaCN – 2 г/л.

Результаты и обсуждение

Обработку результатов вели следующим образом. Прямые экспериментальные данные позволяют построить изотермы сорбции золота активным углем, которые приведены на рис. 1, полученные изотермы удовлетворительно описываются степенным уравнением Фрейндлиха вида

$$E_{\text{угля}} = K_1 \cdot C_{\text{жидк}}^n,$$

где $E_{\text{угля}}$ – содержание Au в угле в конце опыта, г/т; K_1 и n – безразмерные коэффициенты; $C_{\text{жидк}}$ – концентрация Au в жидкой фазе пульпы, мг/л.

Коэффициент изотермы K_1 характеризует сорбционную способность угля и составляет обычно 3000-30000. Сорбционная активность твёрдой фазы в каждой серии рассчитывали по методике «Иргиредмета» как отношение количества золота, обнаруживаемого в жидкой фазе пульпы в конце опыта без сорбента, к количеству извлекаемого золота в исходном сырье:

$$CA = \left(1 - \frac{R \cdot C_{\text{ж}}}{C_{\text{извл}}}\right) \cdot 100,$$

где CA – относительная сорбционная активность сырья, %

R – отношение Ж:Т, м³/т;

$C_{\text{ж}}$ – концентрация Au в жидкой фазе пульпы в конце опыта без сорбента, мг/л;

$C_{\text{извл}}$ – содержание Au в цианируемой форме в исходном концентрате, г/т, определяется заранее.

В приведённом примере СА флотоконцентрата без специальной обработки составляет 88,4%, добавка керосина от 0,5 до 2,0 кг/т позволяет снизить СА до уровня 52,2-79,8%, причём увеличение расхода приводит к планомерному снижению СА.

Полученные экспериментальные данные позволяют составить баланс золота и рассчитать количество золота, сорбированного твёрдой фазой пульпы в каждом проведённом опыте:

$$C_{\text{тв. сорб}} = \frac{(m_{\text{тв}} \cdot C_{\text{извл}}) - (m_{\text{угля}} \cdot E_{\text{угля}}) - (V_{\text{жидк}} \cdot C_{\text{жидк}})}{m_{\text{тв}}},$$

где $C_{\text{тв. сорб}}$ – количество сорбированного золота, г/т; $C_{\text{извл}}$ – содержание Au в цианируемой форме в исходном концентрате, г/т, определяется заранее;

$m_{\text{тв}}$ – масса твёрдой фазы, кг;

$m_{\text{угля}}$ – масса угля, кг;

$E_{\text{угля}}$ – содержание Au в угле в конце опыта, г/т;

$V_{\text{жидк}}$ – объём жидкой фазы, л;

$C_{\text{жидк}}$ – концентрация Au в жидкой фазе пульпы в конце опыта, мг/л.

Зависимость количества сорбированного золота от его равновесной концентрации в жидкой фазе представляет собой изотерму сорбции Au твёрдой фазой пульпы, которая зачастую удовлетворительно аппроксимируется степенным уравнением Фрейндлиха с определением соответствующего коэффициента K_2 по аналогии с активным углем. Изотермы сорбции золота твёрдой фазой для рассматриваемого примера приведены на рис. 2.

Соотношение коэффициентов изотерм Фрейндлиха для активного угля (K_1) и для твёрдой фазы (K_2) характеризует комплексную эффективность обезметалливания пульпы и может применяться для оценки эффективности подавления СА твёрдой фазы с одновременным учётом фактора подавления искусственного сорбента, при этом чем выше K_1/K_2 , тем эффективнее протекает сорбция на уголь. Физический смысл величины K_1/K_2 соответствует среднему коэффициенту распределения Au между активным углем и твёрдой фазой в исследованном диапазоне концентрации Au в жидкой фазе пульпы.

На рис. 3 приведена зависимость K_1/K_2 от величины добавки керосина для рассмотренного примера. Максимальное значение K_1/K_2 на уровне 489 наблюдается при расходе керосина 1,0 кг/т, который является оптимальной величиной. При меньшем расходе керосина СА твёрдой фазы подавляется недостаточно, а увеличение расхода приводит к резкому снижению сорбционной способности угля.

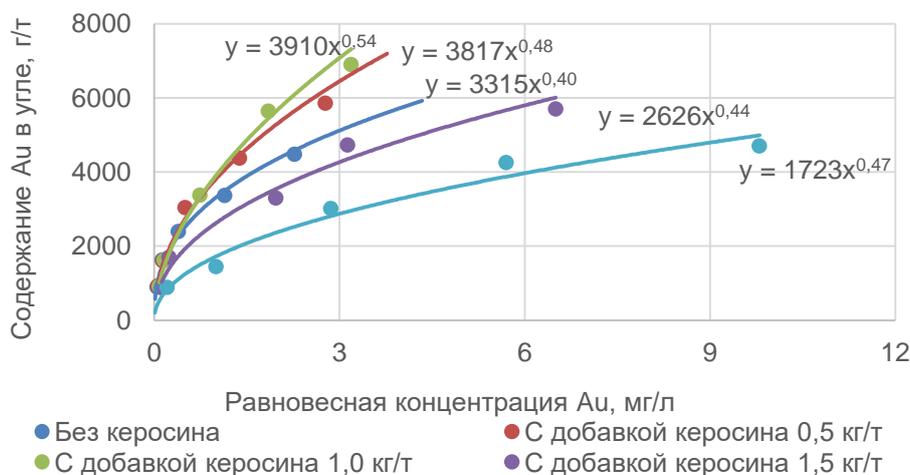


Рис. 1. Изотермы сорбции Au активным углем

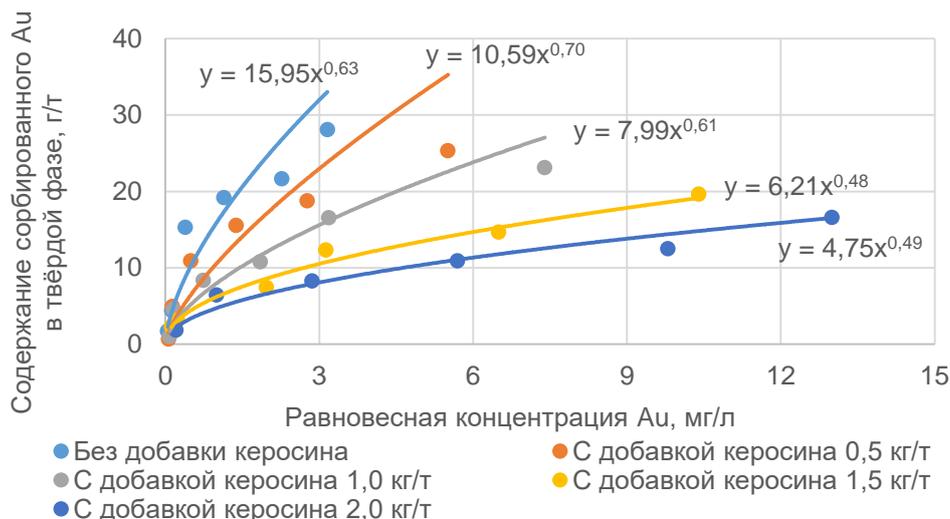


Рис. 2. Изотермы сорбции Au твёрдой фазой пульпы

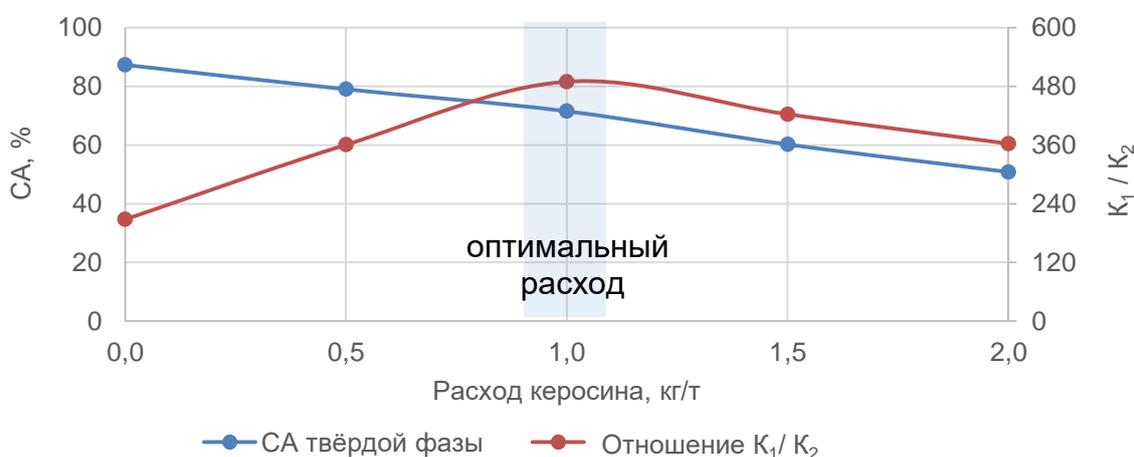


Рис. 3. Зависимость величины CA и соотношения коэффициентов изотерм Фрейндлиха для активного угля (K_1) и для твёрдой фазы (K_2) от величины добавки керосина к питанию цианирования

Следует отметить, что график эффективности использования реагента-подавителя от его расхода, как правило, имеет пик. Физически это связано с тем, что при небольших расходах реагента он практически нацело связывается природным углистым веществом, подавляя его СА. В этом случае эффект подавления природного углистого вещества превалирует над эффектом подавления искусственного сорбента и величина K_1/K_2 увеличивается. При дальнейшем увеличении расхода реагента-подавителя всё большая часть реагента остаётся не прореагировавшей к началу цианирования и избыток реагента связывается искусственным сорбентом, его активность снижается, что вызывает снижение K_1/K_2 .

Заключение

Рекомендуется использовать данную методику для изучения влияния реагентов-подавителей на процесс сорбционного цианирования, так как она позволяет вести одновременный учёт эффекта подавления

СА природного углистого вещества (целевой процесс) и эффекта подавления активного угля (нежелательный побочный процесс). Методика предназначена для проведения исследований при разработке технологий переработки углистого сорбционно-активного золото-содержащего сырья, а также для промышленных предприятий, реализующих CIL- и RIL-процессы цианирования такого сырья.

Список источников

1. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: В 2-х т. Иркутск: ОАО Иргиредмет, 1999. 786 с.
2. Afenya PM (1991) Treatment of carbonaceous refractory gold ores. Miner. Eng. 4:1043–1055. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90082-7](https://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90082-7)
3. Ahmadiantehrani M., Hendrix J.L., Ramadorai G. 1991. Hypochlorite pre-treatment in heap leaching of a low grade carbonaceous ore. Miner. Metall. Proc. 8, 27-31 p.

4. Santiago R.C.C., Ladeira A.C.Q. (2019) Reduction of preg-robbing activity of carbonaceous gold ores with the utilization of surface blinding additives. *Miner Eng* 131:313–320. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.029>
5. Adams M.D., Burger A.M. 1998. Characterization of carbonaceous preg-robbings and abraded carbon in gold residues/ *Miner.Eng.* 11(10), 919-927.
6. Kulpa C.F., Brierle J.A., 1993. Microbial deactivation of pre-robbing carbon in gold ore. In: Torma A.E., Wey J.E., Lakshmanan V.I. (Eds.) *Biohydrometallurgical Technologies*. The Minerals, Metals and Material Society, Warrendale Pennsylvania, pp. 427-435
7. Miller J., Wan R.Y., Díaz X. (2016) Chapter 49 - Preg-robbing gold ores. In: *Gold ore processing* (second edn), pp 885–907. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00049-9>
8. Ng, W. S., Wang, Q., & Chen, M. (2020). A review of Preg-robbing and the impact of chloride ions in the pressure oxidation of double refractory ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1793142>
9. Salazar-Hernández, M. M., Salazar-Hernández, M. del C., Navarro-Barrera, R., Saucedo, I., & Elorza-Rodríguez, E. (2023). Physicochemical characterization of carbonaceous matter associated with refractory precious metals ores. *Journal of Engineering Research*, 3(11). DOI: 10.22533/at.ed.3173112304045
10. Hammerschmidt J, Güntner J, Kerstiens B, Charitos A (2016) Chapter 24 - roasting of gold ore in the circulating fluidized-bed technology. In: Adams M.D. (ed) *Gold ore processing*, 2nd edn. Elsevier, Amsterdam, pp. 393–409. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00024-4>
11. Ofori-Sarpong, G., Adjei, D. K., & Amankwah, R. K. (2017). Fungal-Transformation of Surrogate Sulphides and Carbonaceous Matter in Refractory Gold Ores: Revisited. *Ghana Mining Journal*, 17(2), 56–65. <https://dx.doi.org/10.4314/gm.v17i2.8>
12. Ofori-Sarpong, G., & Osseo-Asare, K. (2013). Preg-robbing of gold from cyanide and non-cyanide complexes: Effect of fungi pretreatment of carbonaceous matter. *International Journal of Mineral Processing*, 119, 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.12.007>
13. Equinox Gold Corp. (2020). NI 43-101 Technical Report on the Santa Luz Project, Bahia State, Brazil, 2020, 311 p.
14. Mabwe, N. R. (2020). Potential pre-treatment and processing routes for recovery of gold from complex (refractory) gold ores. A review. *Proceedings of the 2nd African International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Harare, Zimbabwe, 1708-1715.
15. Liu, Q., Yang, H.-Y., & Tong, L.-L. (2014). Influence of Phanerochaete chrysosporium on degradation and preg-robbing capacity of activated carbon. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24, 1905–1911. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63270-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63270-2)
16. Mustapha, A., Asamoah, R. K., Ofori-Sarpong, G., & Amankwah, R. K. (2014). Preg-robbing characteristics of gold ores in Ghana. 3rd UMoT Biennial International Mining and Mineral Conference, 192–196 p.
17. Wallenius, J. M., & Bernardis, F. L. (2023). Exploiting tailored carboxymethyl cellulose depressant for managing carbon recovery in refractory gold ore flotation. *Metallurgical and Materials Data*, 1(2), p. 51-55. <https://doi.org/10.30544/MMD7>
18. Improving gold recovery from artificial preg-robbing ore by pre-treatment using blinding agent and resin-in-Leach. Mohammad Zaki Mubarak, Prasetyo Sandha Irianto // *J. Eng. Technol. Sci.*, vol. 48, no. 3, 2016, pp. 276-287.
19. Valdivieso-Bermeo, P., Peñaloza, I., & Moreno-Chávez, J. (2020). Treatment for gold ores with high content of carbonaceous matter. *DYNA*, 87(215), 180-185. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.84282>
20. Thella J. S. The influence of mineralogy and surface chemistry on flotation of Cortez complex carbonaceous double refractory gold ore: The University of Queensland. 2018. 271 p.
21. Flores D. M. M. Bio-mineral processing of double refractory gold ores using laccase-mediator system, Kyushu University, 2023. 267 p.
22. Rees K. L. The leaching and adsorption behaviour of gold ores : University of Melbourne, Department of Chemical Engineering, 2000. 399 p.

Сведения об авторах

Бывальцев Александр Владимирович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гидрометаллургии, Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, Иркутск, Россия. E-mail: torrot_2008@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

PROCEDURE FOR OPTIMIZING THE DOSAGE OF BLINDING AGENTS IN CYANIDATION OF PREG-ROBBING CARBONACEOUS GOLD PRODUCTS

Byvaltsev Alexander V. – PhD (Eng.), Leading Researcher of the Hydrometallurgy Laboratory, Irgiredmet JSC, Irkutsk, Russia. E-mail: torrot_2008@mail.ru

Abstracts. The aim is to develop the procedure for selecting the optimal consumption of blinding agents for cyanidation process of preg-robbing carbonaceous products, taking into account their effects on both natural carbonaceous components and artificial adsorbent. The problem lies in the fact that blinding agents, as a rule, simultaneously worsen the adsorption capacity of the synthetic sorbent, which requires precise control of their dosage. The experiments were carried out on a flotation concentrate with a cyanidable gold content of 31.75 g/t with varying kerosene consumption from 0 to 2 kg/t and activated carbon loading, which made it possible to determine the isotherms of gold sorption by coal and the solid phase of the pulp, as well as the amount of sorption activity. The proposed method allowed us to establish that the addition of kerosene 0.5-2.0 kg/t reduces the preg-robbing index of flotation concentrate from 88.4% to 52.2-79.8%, but an excess of the reagent impairs the efficiency of activated carbon. The key indicator is the ratio of the Freundlich isotherm constants for activated carbon (K_1) and for the solid phase (K_2), which reaches a maximum of 489 with a kerosene consumption of 1.0 kg/t. This indicator reflects the average gold distribution coefficient between the activated carbon and the solid phase. A further increase in the dosage of kerosene reduces K_1/K_2 due to the "poisoning" of activated carbon. The technique demonstrates that the optimal flow of the blinding agents corresponds to the peak of K_1/K_2 , where the decline of preg-robbing index of solid phase is maximal, and the negative effect on activated carbon is minimal. The obtained results can be applied to other blinding agents, such as diesel fuel or surfactants. It is recommended to use this approach when selecting the consumption of blinding agents for both research and production purposes.

Keywords: preg-robbing, carbonaceous matter, gold, blinding agents, cyanidation, adsorbent

Ссылка на статью:

Бывальцев А.В. Методика оптимизации расхода реагентов-подавителей сорбционной активности в процессе цианирования углистого золотосодержащего сырья // Теория и технология металлургического производства. 2025. №3(54). С. 4-9.
Byvaltsev A.V. Procedure for optimizing the dosage of blinding agents in cyanidation of preg-robbing carbonaceous gold products. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 54, no. 3, pp. 4-9.