

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ, ГОРНЫЕ НАУКИ

SUBSOIL USE, MINING SCIENCES

Научная статья

УДК 622.765.4

DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-3-34-43

Выбор режима флотации хвостов обогащения хромовых руд с применением катионных собирателей

**Валерий Валентинович Морозов¹, Ирина Васильевна Пестряк²,
Николай Александрович Дубов³, Артемий Владимирович Троицкий⁴**

^{1,2,4}Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Россия

³ООО «РАМ Инжиниринг», г. Москва, Россия

⁴ООО «РАМ», г. Москва, Россия

¹ dchmgu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4105-944X>

² spestryak@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1745-6579>

³clariant@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2597-1456>

⁴a.v.troitski@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-7469-6938>

Актуальность исследования определяется важностью решения задачи переработки хромсодержащих лежальных хвостов, представляющих собой перспективный ресурс увеличения производства хромового концентрата и уменьшения экологической нагрузки на окружающую среду. Объект исследования – процессы переработки хромсодержащих лежальных хвостов с применением флотационной технологии. Предмет исследования – пробы лежальных хвостов Донского ГОКа. Цель исследования – определение оптимальных параметров флотационного обогащения лежальных хромовых хвостов. Основные задачи исследования: определение рациональных границ крупности фракции хромовых хвостов, переработка которой флотационным методом будет эффективна с позиции получения марочного концентрата при приемлемом извлечении ценного компонента; определение оптимального расхода собирателя, обеспечивающего получение требуемых конечных результатов флотационного обогащения по извлечению и качеству получаемого концентрата. Для выбора рациональных режимов обогащения применён метод оптимизации флотационного обогащения лежальных хромовых хвостов, который базируется на использовании нового экономически ориентированного критерия – функции стоимости не извлекаемого металла и потерь вследствие снижения качества получаемого концентрата (приведённых потерь хрома). Результатами проведённых исследований являются оптимальные параметры флотационного обогащения лежальных хромовых хвостов. Определён оптимальный расход собирателя, при котором достигается наименьшее значение приведённых потерь хрома. При применении выбранного расхода собирателя достигается содержание Cr_2O_3 в интервале 47–50 %, что соответствует марке концентрата М3 с соблюдением ограничений по массовой доле железа и оксида кремния. Показано, что выбранный для флотационного обогащения диапазон крупности хвостовой фракции, несмотря на отличающуюся флотируемость отдельных классов крупности, не требует корректировки путём доизмельчения или дополнительного обесшламливания. Основной вывод из проведенных исследований заключается в обосновании возможности и целесообразности применения флотационной технологии обогащения лежальных хромсодержащих хвостов широкого диапазона крупности, позволяющей получить марочный концентрат М3 с извлечением Cr_2O_3 72–76 %.

Ключевые слова: хромсодержащие хвосты, классы крупности, флотация, собиратель, расход, концентрация, содержание, извлечение, оптимизация, экономико-ориентированный критерий

Для цитирования

Морозов В. В., Пестряк И. В., Дубов Н. А., Троицкий А. В. Выбор режима флотации хвостов обогащения хромовых руд с применением катионных собирателей // Вестник Забайкальского государственного университета. 2025. Т. 31, № 3. С. 34–43. DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-3-34-43

© Морозов В. В., Пестряк И. В., Дубов Н. А., Троицкий А. В., 2025



Original article

Selection of the Flotation Mode for Tailings of Chromium Ore Processing Using Cationic Collectors

Valery V. Morozov¹, Irina V. Pestryak², Nikolay A. Dubov³, Artemiy V. Troitskiy⁴

^{1,2,4}National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

³"RAM Engineering" Ltd, Moscow, Russia

⁴"RAM" Ltd, Moscow, Russia

¹dchmggu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4105-944X>

²spestryak@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1745-6579>

³clariant@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2597-1456>

⁴a.v.troitski@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-7469-6938>

The relevance of the work is determined by the importance of solving the problem of processing chromium-containing stored tailings, which represent a promising resource for increasing the production of chromium concentrate and reducing the environmental impact on the environment. The object of this study is the processing of chromium-containing tailings using flotation technology. The subject of the study is samples of stored tails of the Donskoy Mining and Processing Complex. The purpose of the research is to determine the optimal parameters of the flotation enrichment of the chromium-containing tailings. The main objectives of the research are to determine the rational interval of the fraction size of chromium-containing tailings, the processing of which by the flotation method would be effective from the point of view of obtaining a concentrate with acceptable recovery of a valuable component, and to determine the optimal collector consumption, ensuring the required final results of flotation enrichment in plane the recovery and quality of the chromium concentrate. To select rational enrichment modes, a method for optimizing the flotation enrichment of stored chromium-containing tailings has been applied, which is based on the use of a new economically oriented criterion - a function of the cost of non-recoverable metal and losses due to a decrease in the quality of the concentrate obtained (reduced chromium losses). The results of the conducted research are the optimal parameters of flotation enrichment of stored chromium-containing tailings. The optimal collector consumption has been determined, at which the lowest value of the reduced chromium losses is achieved. When using the selected collector flow rate, the Cr_2O_3 content is achieved in the range of 47–50 %, which corresponds to the M3 concentrate grade, subject to restrictions on the mass fraction of iron and silicon oxide. It is shown that the range of fineness of the tail fraction chosen for flotation enrichment, despite the different flotation capacity of individual fineness classes, does not require adjustment by additional grinding or additional desliming. The main conclusion from the conducted research is to substantiate the possibility and expediency of using flotation technology for processing stored chromium-containing tailings of a wide range of fineness, which makes it possible to obtain branded M3 concentrate with 72–76 % Cr_2O_3 recovery tailings using flotation technology.

Keywords: chrome tailings, class size, flotation, collector, consumption, concentration, content, recovery, optimization, economy-oriented criterion

For citation

Morozov V. V., Pestryak I. V., Dubov N. A., Troitskiy A. V. Selection of the Flotation Mode for Tailings of Chromium Ore Processing Using Cationic Collectors // Transbaikal State University Journal. 2025. Vol. 31, no. 3. P. 34–43. DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-3-34-43

Введение. Перспективным источником хрома в России и за рубежом являются техногенные образования, в первую очередь хромсодержащие хвосты, накопившиеся в процессе гравитационного обогащения руд [1; 2, с. 16, 17]. Содержание Cr_2O_3 в этих продуктах может достигать 30 % и более, что делает их привлекательным объектом с экономической точки зрения [3, с. 17, 18]. Такие техногенные месторождения могут быть повторно переработаны с применением комбинированных технологий, включающих процессы гравитационного, магнитного, флотационного обогащения и гидрометаллургической переработки [4, с. 12–14; 5, с. 6, 7; 6, с. 11], что определяет актуальность проведенного исследования.

Объект исследования – процессы переработки хромсодержащих лежальных хвостов с применением флотационной технологии.

Предмет исследования – пробы лежальных хвостов Донского ГОКа.

Цель исследования – определение оптимальных параметров флотационного обогащения лежальных хромовых хвостов.

Анализ литературных данных показывает, что для обогащения лежальных хвостов гравитационного обогащения хромовых руд перспективно применение флотационной или комбинированной гравитационно-флотационной технологии, обеспечивающей извлечение рудных минералов из тонких классов

[7, с. 39, 40; 8, с. 40]. В зависимости от основы минерального комплекса (хромит, хромшпинелиды, оливин или серпентин) выбирают реагентные режимы с применением жирнокислотных собирателей, алифатических аминов и других реагентов [9; 10, с. 823]¹.

Использование флотационной технологии предполагает выбор рациональной схемы пульповодоподготовки и эффективного реагентного режима. Наиболее важным параметром подготовительных операций является выбор крупности флотируемого материала [11, с. 4, 5]. Как правило, во флотационный передел направляют определённый диапазон классов крупности исходных песков. По данным проведённых исследований зашламливание исходного питания или, напротив, подача чрезмерно крупного материала приводят к ухудшению показателей флотации [12, с. 60–62; 13, с. 24].

Основным параметром реагентного режима флотации хромовых и других типов руд являются концентрации и расходы реагентов, в первую очередь – собирателя [14, с. 584; 15, с. 126, 127]. Чрезмерные расходы собирателя, с одной стороны, увеличивают затраты на переработку сырья, а с другой – создают трудности при организации экологически безопасного замкнутого водооборота обогатительной фабрики.

Основной задачей исследований стал выбор оптимальных значений крупности флотируемого материала и расхода собирателя Oxfloat A-780. Для определения оптимальных параметров рудоподготовки, флотации схемы и технологии обогащения лежальных хвостов гравитационного обогащения хромовых руд Донского ГОКа проведены флотационные исследования в условиях варьирования крупности обогащаемого продукта и расхода собирателя.

Методология и методы исследования. Для получения питания процессов флотации с различной крупностью исходный материал – пробу лежальных хвостов Донского ГОКа – подвергали классификации гидроциклонированием на лабораторной установке в полузамкнутом режиме с выделением восьми продуктов. Контроль качества классификации пробы осуществляли рассевом мокрым способом по крупности 37 мкм. Удаляемая из процесса гидроциклонирования начальная фракция содержала наиболее крупные фракции (выход класса -37 мкм 17–30 %). Средние

фракции характеризовались выходом класса -37 мкм в 45–65 %. Мелкие фракции содержали 83–96 % класса -37 мкм.

Флотационные опыты проводили в механических флотомашинках механического типа «Механобр» с объёмом камеры 0,5 и 1,0 дм³. Навеску хвостов массой 200 г переносили в стакан объёмом 1 л, куда добавляли 800 мл оборотной воды. После агитации с собирателем в течение 2 мин пробу перегружали в лабораторную флотационную машину, где проводили операции флотации хромовой головки, основной и контрольной флотации (рис. 1).

Хвосты контрольной флотации являлись отвальным продуктом. Пенный продукт основной и контрольной флотации направлялся на перечистку во флотационную машину объёмом камеры 0,5 дм³. Расход воздуха во флотомашину, число оборотов импеллера и частота съёма пены поддерживались постоянными.

Концентрат перечистки и хромовая головка 4-го цикла, как и камерный продукт контрольной флотации, являлись конечными продуктами. Хвосты перечистки и концентрат контрольной флотации 1–3-го циклов флотации направлялись в голову последующего цикла.

В качестве собирателя и одновременно вспенивателя применяли реагент Oxfloat A-780, представляющий собой преимущественно смесь алифатических аминов и ацетамидов, разработанный для флотации окисленных металлических и неметаллических руд [16]. К особенностям данного собирателя относят высокую селективность и наличие вспенивающего эффекта². Расход собирателя в операции хромовой головки, основной и контрольной флотации, перечистной флотации составил 35, 30, 20 и 15 % соответственно.

Продолжительность флотации по указанным операциям составила 3, 5, 3 и 5 мин соответственно.

Замкнутый опыт включал 4 цикла флотации, что обеспечивало требуемое приближение к реальному процессу [17, с. 145].

Твёрдая фаза концентрата и хвостов поступала на химический анализ, проводившийся в соответствии с рекомендованными методиками.

¹ Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твёрдых полезных ископаемых. Хромовые руды. – М., 2007. – 38 с.

² ГОСТ 15848.1-90. Руды хромовые и концентраты. Метод определения оксида хрома (III). – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294836/4294836472.pdf> (дата обращения: 12.06.2025). – Текст: электронный.

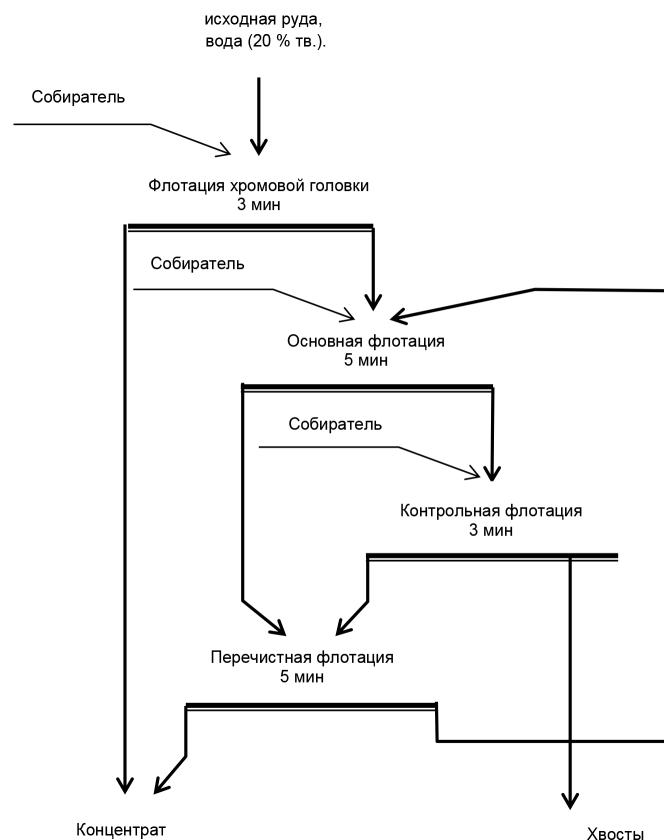


Рис. 1. Схема замкнутого флотационного опыта по флотации хромовых хвостов /
Fig. 1. Scheme of a closed flotation experiment on chrome tailings flotation

Для измерения концентрации применяемого собирателя применён титриметрический метод с индикатором Эозин Н [18, с. 49–51; 19, с. 30–32].

Результаты исследования. Результаты измерений остаточной концентрации собирателя в водной фазе операции кондиционирования, проведённых титриметрическим ме-

тодом с индикатором Эозин Н, показали, что мелкие классы хромовых хвостов в большей мере поглощают собиратель (таблица). Это приводит к более существенному снижению остаточной концентрации собирателя и обуславливает необходимость увеличения его расхода для поддержания требуемых условий флотации [20, с. 234, 235; 21, с. 29, 30].

**Результаты измерения остаточной концентрации собирателя при кондиционировании хромсодержащих хвостов различной крупности с раствором различной концентрации /
Results of measuring the residual concentration of the collector during conditioning of chromium-containing tailings of various sizes with a solution of different concentrations**

Содержание класса -37 мкм в пробе, % / Content of the class is less than 37 microns in the sample, %	Расход собирателя, г/м / Collector's consumption, g/t		
	600	700	800
	остаточная концентрация собирателя, мг/л / residual concentration of the collector, mg/l		
17	25,0	34,3	44,5
30	22,4	29,5	37,4
36	21,4	27,5	35,5
45	18,4	24,5	31,9
53	16,7	23,4	28,5
67	14,4	20,4	26,4
83	12,4	18,6	23,9
96	10,4	15,6	20,9
	Выбранные для экспериментов интервалы остаточных концентраций и расходы собирателя The ranges of residual concentrations selected for the experiments and the collector's expenses		

При флотации выделенных навесок различной крупности поддерживался расход собирателя 600, 700 и 800 г/т. В соответствии с практикой флотации хромовых руд больший расход собирателя (800 г/т) использовали при флотации проб крупностью 83 и 96 % класса -37 мкм, меньший (600 г/т) – при флотации проб крупностью 17, 30 и 36 % класса 37 мкм. По данным измерений остаточной концентрации собираителя выбранный интервал варьирования расхода реагента – собираителя – обеспечивал близкую остаточную концентрацию собираителя – 20–25 мг/л (см. таблицу).

Задачей первого цикла исследований стало определение флотируемости отдельных классов крупности хромовых хвостов. Такие исследования необходимы для выбора границ крупности флотируемого класса, а также для установления уровня влияния шламовых классов на флотацию объединённой пробы [22, с. 203]. Конечной целью исследований стало установление целесообразности доизмельчения или разделения исходного материала на отдельные классы крупности для достижения их лучшей обогатимости [23, с. 11–13].

Результаты флотационных опытов, проводимых в замкнутом цикле, показали, что при варьировании крупности флотируемого материала прослеживается закономерность снижения технологических показателей – извлечения хрома и качества концентрата при флотации крупных (менее 30 % класса -37 мкм) и мелких (более 60 % класса -37 мкм) фракций (рис. 2).

Сопоставление качественно-количественных показателей, полученных после измерения содержания Cr_2O_3 и расчёта технологических балансов, показало, что для всех классов крупности показана возможность получения концентрата с содержанием Cr_2O_3 46–51 % при достаточно высоком извлечении (63–77 %). Суммарное извлечение Cr_2O_3 в концентрат составило 70,2 %, содержание хрома в концентрате – 49,6 %.

Обогатимость отдельных классов крупности хвостов гравитационного обогащения флотацией оценивалась с применением экономически ориентированного комплексного критерия. Применённый критерий оптимизации представлял собой функцию приведённых потерь, определяющую стоимость теряемого металла и дополнительно учитывавшую изменение стоимости концентрата при изменении его качества. Используемый критерий, по сути, аналогичен предложенному авторами работы [24, с. 1227, 1228]. Расчётная зависимость для определения значения критерия приведённых потерь имеет следующий вид:

$$Q_t = \varepsilon^* \mathbb{U}_{\text{Cr}} \alpha_{\text{Cr}} + \varepsilon_{\text{Cr}} \mathbb{U}_{\text{Cr}} \alpha_{\text{Cr}} (50 - \beta_{\text{Cr}}) \Delta \mathbb{U}_{\text{Cr}}, \quad (1)$$

где $\varepsilon^* \mathbb{U}_{\text{Cr}}$ – извлечение и потери Cr_2O_3 в процессе флотации; \mathbb{U} – цена металла в концентрате М3; α_{Cr} , β_{Cr} – содержание Cr_2O_3 в исходном питании и концентрате; $\Delta \mathbb{U}_{\text{Cr}}$ – потери стоимости концентрата при снижении массовой доли Cr_2O_3 менее 50 % (в расчёте на 1 %).

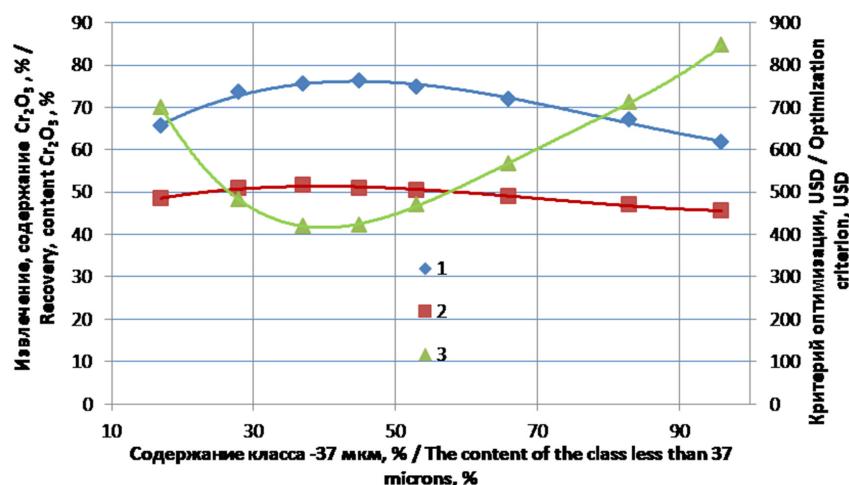


Рис. 2. Зависимости извлечения (1), содержания (2) Cr_2O_3 в концентрате и критерия оптимизации (3) от содержания класса -37 мкм во флотируемом материале /

Fig. 2. Dependences of recovery (1), Cr_2O_3 content (2) in the concentrate and optimization criterion(3) on the content of class -37 microns in the floated material

Целесообразность применения экономических критериев оценки эффективности технологического процесса обусловлена в первую очередь противоположным влиянием расхода собирателя на извлечение ценного компонента и качества получаемого концентрата [25, с. 180, 181].

Анализ полученной зависимости (см. рис. 2, кривая 3) показывает заметные отличия во флотируемости различных классов крупности и, в частности, существенное увеличение потерь ценного компонента в стоимостном выражении, связанных с уменьшением извлечения хрома и снижения качества концентрата при флотации более мелких классов.

В целом, полученные результаты позволяют заключить, что общая проба не содержит труднофлотируемых классов, а её дополнительная классификация с целью удаления

мелких классов или доизмельчение крупных классов нецелесообразны. Сравнение расчётных показателей обогащения отдельных классов крупности с фактически полученными показателями при флотации объединённой пробы показало, что использование раздельной флотации позволит увеличить извлечение и содержание Cr_2O_3 на 0,5–1,5 %, однако такой прирост не компенсирует затраты на операции гидравлической классификации и раздельной флотации.

Дальнейшие исследования, целью которых стало определение оптимального расхода собирателя, проводили на общей пробе со средним содержанием класса -37 мкм 50 %. Результаты проведённых флотационных экспериментов показали, что увеличение расхода собирателя закономерно уменьшает потери Cr_2O_3 , но при этом снижается качество получаемого концентрата (рис. 3).

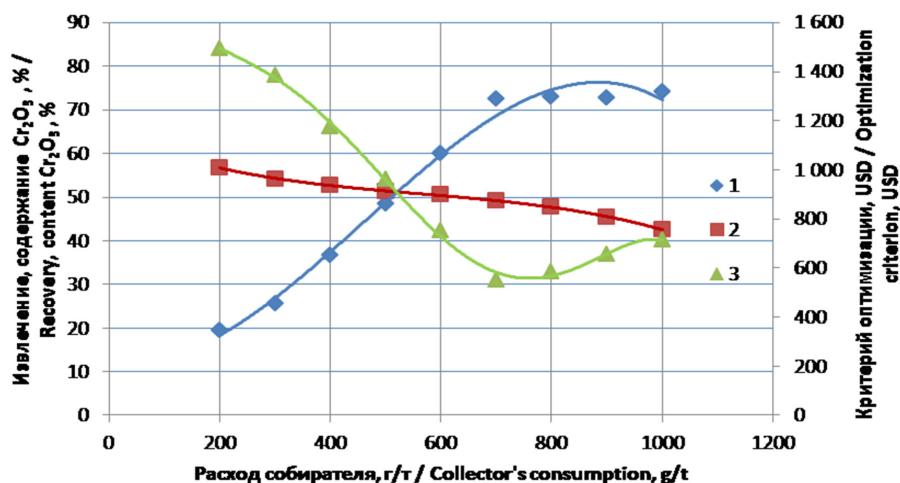


Рис. 3. Зависимости извлечения (1), содержания (2) Cr_2O_3 в общем концентрате и критерия оптимизации от расхода собирателя / **Fig. 3.** Dependences of recovery (1) and content (2) of Cr_2O_3 in the total concentrate and optimization criterion on collector consumption

Извлечение хрома плавно увеличивается при увеличении расхода собирателя от 200 до 600 г/т и стабилизируется при расходе 800–1000 г/т (см. рис. 2). При этом во всём диапазоне расходов имеет место снижение массовой доли Cr_2O_3 (см. рис. 3). Максимальное извлечение Cr_2O_3 в концентрат достигается при общем расходе собирателя 650–800 г/т, при этом достигается массовая доля Cr_2O_3 в интервале 47–50 %, что соответствует марке концентрата М3 по ТУ 2111-003-52967881-2009. Массовая доля железа и оксида кремния не превышает установленных кондиций.

Оптимальный расход собирателя во флотационный цикл так же, как и в предыдущих исследованиях, определён с использованием экономически ориентированного критерия приведённых потерь.

Полученная зависимость критерия оптимизации (см. рис. 3, кривая 3) характеризуется выраженным минимумом в области расхода собирателя 700 г/т. Полученная величина расхода собирателя позволяет оценить предполагаемые затраты на реагенты при использовании флотационной технологии обогащения лежальных хвостов Донского ГОКа.

Таким образом, проведённые эксперименты показали возможность и целесообразность применения флотационного обогащения лежальных хвостов, позволяющего получить марочный концентрат МЗ с извлечением Cr_2O_3 в концентрат 72–76 %. Показано, что выбранный диапазон крупности хвостовой фракции не требует корректирования гранулометрического состава путём доизмельчения или дополнительного обесшламливания. В результате технико-экономической оценки также определён рациональный расход собирателя – 700 г/т, при котором достигается наименьшее значение экономически ориентированного критерия оптимизации – приведённых потерь хрома.

Заключение. Проведённое исследование позволило определить параметры флотационного обогащения лежальных хромовых хвостов. С использованием экономико-ориентированного критерия – функции стоимости теряемого с хвостовыми продуктами металла и стоимостных потерь вследствие снижения

качества концентрата (приведённых потерь хрома) – определена обогатимость рудного материала различной крупности и выбран диапазон оптимального расхода собирателя.

Показано, что мелкие классы флотируемого материала в большей мере поглощают собиратель, что приводит к снижению его остаточной концентрации и обуславливает необходимость увеличения расхода.

Подтверждены возможность и целесообразность применения флотационной технологии обогащения лежальных хвостов Донского ГОКа, позволяющей получить марочный хромовый концентрат с извлечением 72–76 %.

Установлено, что выбранный для флотационного обогащения диапазон крупности хвостовой фракции не требует корректирования гранулометрического состава путём доизмельчения или дополнительного обесшламливания. Показано, что минимальные значения используемого критерия оптимизации (приведённых потерь хрома) достигаются при расходе собирателя 700 г/т.

Список литературы

- Гришин И. А., Князбаев Ж.А. Анализ современного состояния теории и практики обогащения хромовых руд. Обзор // Комплексное использование минерального сырья. 2017. № 1. С. 10–15.
- Абдулвалиев Р.А., Абықирова Г.Ж., Дюсенова С.Б., Имангалиева Л.М. Обогащение хромитсодержащих шламов // Обогащение руд. 2017. № 6. С. 15–19. DOI: 10.17580/or.2017.06.03. EDN: ZWMLPJ
- Газалеева Г. И., Шихов Н. В., Власов И. А., Шигаева В. Н. Разработка технологии дообогащения хромитовых хвостов Донского ГОКа // Обогащение руд. 2017. № 2. С. 15–19. DOI: 10.17580/or.2017.02.03. EDN: YKVZEF
- Гладышев С.В., Абдулвалиев Р.А., Кенжалиев Б.К., Дюсенова С.Б., Имангалиева Л.М. Получение хромитового концентрата из хвостов обогащения // Комплексное использование минерального сырья. 2018. № 1. С. 12–17.
- Mati S., Cukalla M., Bakallbashi J. New concepts and solutions for beneficiation of low-grade chrome ores in Albania. 2024. URL: <https://www.researchgate.net/publication/385903331> (дата обращения: 14.05.2025). Текст: электронный.
- Tastanov Y., Serzhanova N., Ultarakova A., Sadykov N., Erzhanova Z., Tastanova A. Recycling of chrome-containing waste from a mining and processing plant to produce industrial products // Processes. 2023. Vol. 11. DOI: 10.3390/pr11061659. EDN: NIFUFA
- Имекешова М.А., Серик Ж.С. Особенности обогащения хромсодержащих шламовых хвостов в условиях южно-кемпирского месторождения (Республика Казахстан) // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2024. Т. 14, № 3. С. 38–42.
- Морозов Ю.П., Абықирова Г.Ж., Бекчурин Е.А., Дюсенова С.Б. Повышение эффективности флотоклассификации руд и хвостов обогащения // Обогащение руд. 2017. № 2. С. 38–43. DOI: 10.17580/or.2017.02.07. EDN: YKVZFT
- Yigit E., Saridede M. N., Ozcimen D. The flotation of South African chromite ores in acidic media // Proceedings 23rd International Conference on Metallurgy and Materials. 2014. P. 1357–1361. URL: https://www.researchgate.net/publication/288108263_The_flotation_of_South_African_chromite_ores_in_acidic_media (дата обращения: 12.06.2025). Текст: электронный.
- Güven O., Serdengeçti V., Tunç B., Ozdemir O., Karaağaoğlu I., Çelik M. Effect of particle shape properties on selective separation of chromite from serpentine by flotation // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2020. No. 56. P. 818–828. DOI: 10.37190/ppmp/125734. EDN: YDKSZG
- Ross V., Ramonotsi M., Marape G. A study on the recovery of fine chromite from UG2 tailings // Minerals Engineering. 2022. No. 187. 107801. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107801. EDN: NMACIS
- Тусбаев Б.Н., Алиакпарова Г.М., Акимжанов Ж.А., Кауанова Л.С., Сандыбеков Р.А., Абдуразакова Б.Б. Исследование флотационного обогащения хромсодержащих шламовых хвостов шламохранилищ Донского ГОКа в период 2017–2020 годов // Интернаука. 2021. No. 43. DOI: 10.32743/26870142.2021.43.219.314207. EDN: LPTNVL

13. Иванов Г.И., Шевченко И.В., Каменева Е.В., Кузьмин С.А. Флотация шламов хромовых руд из отходов гравитационного обогащения // Интеграция науки и производства в горно-металлургической промышленности: сб. науч. тр. ВНИИЦВЕТМЕТ. 2016. С. 22–28.
14. Deniz V. Application of multiple linear regression (MLR) analysis for concentration of chromite tailings by the flotation // Physicochemical Problem of Mineral Processing. 2020. № 56. Р. 579–589. DOI: 10.37190/prmp/122710.
15. Кондратьев С.А., Семьянова Д.В. Закономерности флотации несульфидных минералов катионными собирателями // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 2. С. 119–130.
16. Yingyong G., Kuangdi X. Aliphatic Amine Collector // The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy / ed. K. Xu. Springer, Singapore, 2023. DOI: 10.1007/978-981-19-0740-1_864-1
17. Митрофанов С.И., Барский Л.А., Самыгин В.Д. Исследование полезных ископаемых на обогащимость. М.: Недра, 1974. 352 с.
18. Сергеев И.А., Суслов С.Ю., Тимофеев Н.В. Аналитические методики определения содержания полиаминов в водах ТЭС // Энергетик. 2014. С. 48–52.
19. Пестряк И.В., Морозов В.В., Гордей Ю.А., Новиков Н.Д., Королев А.В. Разработка методик измерения концентрации катионного собирателя и флокулянта в водной фазе флотационной пульпы // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: сб. ст. XXX Междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 2025. С. 30–33.
20. Gallios G.P., Deliyanni E.A., Peleka E.N., Matis K.A. Flotation of chromite and serpentine // Separation and Purification Technology. 2007. Vol. 55, iss. 2. P. 232–237. DOI: 10.1016/j.seppur.2006.12.015. EDN: KNTAOX
21. Yuxian Yu, Liqiang Ma, Mingli Cao, Qi Liu. Slime coatings in froth flotation: A review // Minerals Engineering. 2017. Vol. 114. P. 26–36. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.09.002. EDN: YHGLUW
22. Phiri T., Tepa C., Nyati, R. Effect of Desliming on Flotation Response of Kansanshi Mixed Copper Ore // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2019. No. 7. P. 193–212. DOI: 10.4236/jmmce.2019.74015
23. Cedrick I.S., Patrick T.N., Gigi K.K., Jean-Marie K.N., Hugues D.W.M. Influence of particle size on the batch flotation of Concentrator Tailings with a view to their industrial recovery // Advance Research Journal of Multidisciplinary Discoveries. 2022. No. 78. P. 7–15. DOI: 10.5281/zenodo.7590252
24. Morozov V.V., Lodoy, Delgerbat, Ishgen Churelchuluun, Jargalsaikhan Erdenezul. Application of optical analysis of ore for automated control of the ore beneficiation. IFAC-PapersOnLine. 2021. No. 54. P. 1224–1229. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.08.145. EDN: BLXUSR
25. Эрдэнээул Жаргалсайхан, Морозов В.В. Оптимизация крупности измельчения медно-молибденовых руд с использованием модельориентированных критериев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. No. 8. С. 176–183. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-8-0-176-183. EDN: LXSWMX

References

1. Grishin IA, Knyazbaev ZhA. Analysis of the current state of theory and practice of chrome ore beneficiation. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syriya*. 2017;(1):10–15. (In Russian).
2. Abdulvaliev RA, Abdykirova GZh, Dyusenova SB, Imangaliyeva LM. Concentration of chromite-containing slimes. *Obogashchenie Rud*. 2017;(6):15–19. DOI: 10.17580/or.2017.06.03. EDN: ZWMLPJ (In Russian).
3. Gazaleeva GI, Shikhov NV, Vlasov IA, Shigaeva VN. The Donskoy ore mining and processing industrial complex chromite tailings retreatment technology development. *Obogashchenie Rud*. 2017;(2):15–19. DOI: 10.17580/or.2017.02.03. EDN: YKVZEF (In Russian).
4. Gladyshev SV, Abdulvaliyev RA, Kenzhaliyev BK, Dyusenova SB, Imangaliyeva LM. Production of chromite concentrate from tailing of ore beneficiation. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syriya*. 2018;(1):12–17. (In Russian).
5. Mati S, Cukalla M, Bakallbashi J. New concepts and solutions for beneficiation of low-grade chrome ores in Albania; 2024. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/385903331> (accessed 14.05.2025).
6. Tastanov Y, Serzhanova N, Ultarakova A, Sadykov N, Erzhanova Z, Tastanova A. Recycling of chrome-containing waste from a mining and processing plant to produce industrial products. *Processes*. 2023;11. DOI: 10.3390/pr11061659. EDN: NIFUFA
7. Imekeshova M, Serik Zh. Peculiarities of processing of chromium-containing slurry tailings in conditions of the south kempirsay deposit (republic of Kazakhstan). *Subsurface Management and Transportation Systems*. 2024;14(3):38–42. (In Russian).
8. Morozov YuP, Abdykirova GZh, Bekchurina EA, Dyussenova SB. Ores and processing tailings flotation classification efficiency increase. *Obogashchenie Rud*. 2017;(2):38–43. DOI: 10.17580/or.2017.02.07. EDN: YKVZFT (In Russian).
9. Yigit E, Sarıdede MN, Ozcimen D. The flotation of South African chromite ores in acidic media. In: Proceedings 23rd International Conference on Metallurgy and Materials; 2014. P. 1357–1361. Available at: https://www.researchgate.net/publication/288108263_The_flotation_of_South_African_chromite_ores_in_acidic_media (accessed 12.06.2025).

10. Güven O, Serdengeçti V, Tunç B, Ozdemir O, Karaağaçlıoğlu I, Çelik M. Effect of particle shape properties on selective separation of chromite from serpentine by flotation. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2020;(56):818–828. DOI: 10.37190/ppmp/125734. EDN: YDKSZG
11. Ross V, Ramonotsi M, Marape G. A study on the recovery of fine chromite from UG2 tailings. *Minerals Engineering*. 2022;(187):107801. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107801. EDN: NMACIS
12. Tusbayev B, Aliakparova G, Akimzhanov Zh, Kauanova L, Sandybekov R, Abdurzakova B. Study of flotation enrichment of chromium-containing sludge tails of slurry deposits of the Donskoy GOK in the period of 2017–2020. *Internauka*. 2021;(43). DOI: 10.32743/26870142.2021.43.219.314207. EDN: LPTNVL (In Russian).
13. Ivanov GI, Shevchenko IV, Kameneva EV, Kuzmin SA. Flotation of chromite ore slimes from gravity concentration waste. In: Integration of Science and Production in the Mining and Metallurgical Industry. Proceedings of VNIIltsvetmet; 2016. P. 22–28. (In Russian).
14. Vedat Deniz. Application of multiple linear regression (MLR) analysis for concentration of chromite tailings by the flotation. *Physicochemical Problem of Mineral Processing*. 2020;(56):579–589. DOI: 10.37190/ppmp/122710
15. Kondratiev SA, Semyanova DV. Patterns of flotation of non-sulfide minerals with cationic collectors. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2016;(2):119–130. (In Russian).
16. Yingyong G, Kuangdi X. Aliphatic Amine Collector. In: Xu K (ed). The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy. Springer, Singapore; 2023. DOI: 10.1007/978-981-19-0740-1_864-1
17. Mitrofanov SI, Barskii LA, Samygin VD. Study of minerals for beneficiation. Moscow: Nedra; 1974. 352p. (In Russian).
18. Sergeev IA, Suslov SYu, Timofeev NV. Analytical methods for determining the content of polyamines in thermal power plant waters. *Energetik*. 2014;48–52. (In Russian).
19. Pestryak IV, Morozov VV, Gordei YuA, Novikov ND, Korolev AV. Development of methods for measuring the concentration of cationic collector and flocculant in the aqueous phase of flotation pulp. In: Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials: collection of articles. XXX Int. scientific and technical. conf. Ekaterinburg; 2025. P. 30–33. (In Russian).
20. Gallios GP, Deliyanni EA, Peleka EN, Matis KA. Flotation of chromite and serpentine. *Separation and Purification Technology*. 2007;55(2):232–237. DOI: 10.1016/j.seppur.2006.12.015. EDN: KNTAOX
21. Yuexian Yu, Liqiang Ma, Mingli Cao, Qi Liu. Slime coatings in froth flotation: A review. *Minerals Engineering*. 2017;114:26–36. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.09.002. EDN: YHGLUW
22. Phiri T, Tepa C, Nyati R. Effect of Desliming on Flotation Response of Kansanshi Mixed Copper Ore. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2019;(7):193–212. DOI: 10.4236/jmmce.2019.74015
23. Cedrick IS, Patrick TN, Gigi KK, Jean-Marie KN, Hugues DWM. Influence of particle size on the batch flotation of Concentrator Tailings with a view to their industrial recovery. *Advance Research Journal of Multidisciplinary Discoveries*. 2022;(78):07–15. DOI: 10.5281/zenodo.7590252
24. Morozov VV, Lodoy, Delgerbat, Ishgen Churelchuluun, Jargalsaikhan Erdenezul. Application of optical analysis of ore for automated control of the ore beneficiation. In: IFAC-PapersOnLine. 2021;(54):1224–1229. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.08.145. EDN: BLXUSR
25. Erdenesul J, Morozov VV. Optimizing copper-molybdenum ore milling coarseness using model-oriented criteria. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2018;(8):176–183. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-8-0-176-183. EDN: LXSWMX (In Russian).

Сведения об авторах

Морозов Валерий Валентинович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры общей и неорганической химии, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Россия; dchmggu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4105-944X>. Область научных интересов: исследование и моделирование физико-химических процессов переработки рудного сырья, автоматизированный контроль процессов обогащения.

Пестряк Ирина Васильевна, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой общей неорганической химии, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Россия; spestryak@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1745-6579>. Область научных интересов: исследование и моделирование физико-химических процессов переработки техногенного сырья, методики аналитического контроля процессов обогащения.

Дубов Николай Александрович, ведущий технолог, ООО «PAM Инжиниринг», г. Москва, Россия; clariant@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2597-1456>. Область научных интересов: исследование и разработка технологий процессов обогащения.

Троицкий Артемий Владимирович, аспирант кафедры общей и неорганической химии, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Россия; старший технолог, ООО «PAM», г. Москва, Россия; a.v.troitski@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-7469-6938>. Область научных интересов: исследование и разработка технологий процессов обогащения.

Information about the authors

Morozov Valery V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the General and Inorganic Chemistry department, National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia; dchmggu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4105-944X>. Research interests: research and modeling of physical and chemical processes of ore processing; automated control of enrichment processes.

Pestryak Irina V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the General Inorganic Chemistry department, National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia; spestryak@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1745-6579>. Research interests: research and modeling of physical and chemical processes of processing technogenic raw materials; methods of analytical control of enrichment processes.

Dubov Nikolay A., Leading Process Engineer, "RAM Engineering" Ltd, Moscow, Russia; clariant@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2597-1456>. Research interests: research and development of technologies for enrichment processes.

Troitskiy Artemiy V., Postgraduate Student, General and Inorganic Chemistry department, National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia; senior process engineer, "RAM" Ltd, Moscow, Russia; a.v.troitski@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-7469-6938>. Research interests: research and development of technologies for enrichment processes.

Вклад авторов в статью

Морозов В.В. – выбор направления, разработка программы исследований, анализ результатов.

Пестряк И. В. – разработка методик исследований, анализ результатов.

Дубов Н. А. – экспериментальные исследования.

Троицкий А. В. – экспериментальные исследования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors' contribution to the article

Morozov V.V – selection of the direction, development of the research program, analysis of the results.

Pestryak I. V. – development of the research methods, analysis of the results.

Dubov N. A. – experimental research.

Troitskiy A. V. – experimental research.

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

**Статья поступила в редакцию 28.07.2025; одобрена после рецензирования 26.08.2025;
принята к публикации 25.09.2025.**

**Received 2025, July 28; approved after review 2025, August 26;
accepted for publication 2025, September 25.**