

УДК 622.7.341.1 DOI:

## ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ЗБАГАЧЕННЯ ЗАЛІЗИСТИХ КВАРЦИТІВ

### Микола Сокур

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри маркетингу

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського вул. Першотравнева, 20,  
Кременчук, Полтавська область, Україна, 39600;

ORCID: 0000-0001-6779-3293

### Роман Аргат

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри машинобудування

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського вул. Першотравнева, 20,  
Кременчук, Полтавська область, Україна, 39600, argat.rg@gmail.com;

ORCID: 0000-0001-9247-5297

### Володимир Білецький

доктор технічних наук, професор

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» вул. Кирпичова, 2, Харків,  
Україна, 61002, ukcdb@i.ua;

ORCID: 0000-0003-2936-9680

### Віта Равінська

начальник випробувального центру

ПрАТ «Полтавський ГЗК», вул. Будівельників, 16, Горішні Плавні, Полтавська область, Україна, 39802;

ORCID: 0000-0003-3040-3938

Залізні руди є основною промисловою мінеральною сировиною для виробництва чавуну та сталі. Зростання добування залізних руд останнім часом здійснюється за рахунок їхніх бідних різновидів, які вимагають високоефективного збагачення при підготовці їх до металургійної переробки. Мета статті – вибір раціональної принципової схеми збагачення залізистих кварцитів для таких мінеральних різновидів руд: магнетитова; карбонатно-магнетитова; силікатно-карбонатно-магнетитова; гематито-магнетитова; силікатно-магнетитова; магнетито-силікатна; гематито-мартитова; гематитова; магнетито-гематитова; лімоніто-мартитова; магнетито-лімоніто-мартитова; мартитова. Для вибору раціональної принципової схеми збагачення залізистих кварцитів виконано аналіз технологічних схем збагачення залізистих кварцитів з урахуванням їх текстури, структури, фізико-механічних властивостей, хімічного і мінералогічного складу. При цьому виділені такі основні структури руди: середнього вкраплення (індекс структури С), дрібновкраплена (індекс структури М), тонковкраплена (індекс структури Т<sub>1</sub>), тонковкраплена (індекс структури Т<sub>2</sub>), особливо тонковкраплена (індекс структури ВТ), дисперсна система (індекс структури Д). У результаті для окремих мінеральних різновидів і структури залізистих кварцитів обрані раціональні схеми їх збагачення, що забезпечують високу якість концентрату – максимальний вміст в ньому заліза. У процесі аналізу удосконалено методику вибору раціональних технологічних схем збагачення мінеральних різновидів залізних руд, яка пропонується до застосування в умовах вітчизняних гірничо-збагачувальних підприємств, зокрема, Криворізького залізорудного басейну.

**Ключові слова:** залізисті кварцити, збагачення залізних руд, технологічні схеми збагачення, текстура, структура, фізико-механічні властивості, хімічний і мінералогічний склад руд, якість залізорудного концентрату.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Залізні руди є основною промисловою мінеральною сировиною для виробництва чавуну та сталі. Вони класифікуються за вмістом рудних і нерудних мінералів [1].

До основних рудних мінералів залізних руд відносять наступні мінерали: магнетит –

$\text{Fe}_3\text{O}_4$  (72,3 % заліза), гематит і мартит –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (70 % заліза), сидерит –  $\text{FeCO}_3$  (48,2 %), гетит –  $\text{FeO}$  (63 %) і гідрогетит –  $\text{FeO} \cdot \text{H}_2\text{O}$  (48–56 %) [2; 3].

Зростання добування залізних руд останнім часом здійснюється за рахунок їхніх бідних різновидів, які вимагають високоефективного

збагачення при підготовці їх до металургійної переробки Частка багатих залізних руд з вмістом заліза більше 55 %, які використовуються без збагачення, складає всього 9,4 %, в той час руд, які необхідно збагачувати за найпростішими схемами – 78–80 % [5; 6; 7].

Для промислової оцінки родовища залізних руд, які вимагають збагачення, необхідно мати великий обсяг інформації про їх речовий склад, текстуру, структуру, фізико-механічні властивості, хімічний склад. Під речовинним складом руд розуміють дані про хімічний і мінеральний склад. Текстура руд обумовлена формою, розміром і просторовим розташуванням агрегатів різного мінерального складу. Структура руди обумовлена формою, розміром та характером зростання зерен мінералів в агрегатах [8–12].

Фізико-механічні властивості руд обумовлені їх речовинним складом, текстурою, структурою та геологічними умовами їх утворення.

Хімічний склад руди дозволяє оцінити її якість, яка характеризується вмістом заліза та інших корисних і шкідливих елементів.

Мінеральний склад руди залежно від фізичних і фізико-хімічних властивостей основних рудних мінералів визначає метод збагачення

руди: магнітний, гравітаційний, флотаційний або комбінований [9–12].

Текстура і структура руди обумовлюють схему збагачення руди. Від текстури залежать необхідна початкова і кінцева крупність подрібнення, яка забезпечує оптимальне розкриття корисних компонентів. Структура впливає на число стадій подрібнення і крупність кінцевих продуктів за стадіями для забезпечення максимального розкриття основних рудних мінералів. За результатами вивчення складу зерен рудних мінералів, наявності в них різних включень й ізоморфних домішок визначають можливий максимальний вміст заліза в концентраті та склад домішок у ньому [12].

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Раціональну технологічну схему збагачення того чи іншого типу залізної руди вибирають на основі науково-обґрунтованих і експериментально підтверджених результатах досліджень руди на збагачуваність.

Найбільш поширені на практиці схеми збагачення різних типів залізних руд наведені нижче на рис. 1.

Схема гравітаційного збагачення (рис. 1, а) застосовується при збагаченні дрібноокраплених і середньокраплених гематито-магнетитових і гематито-мартитових руд [13].

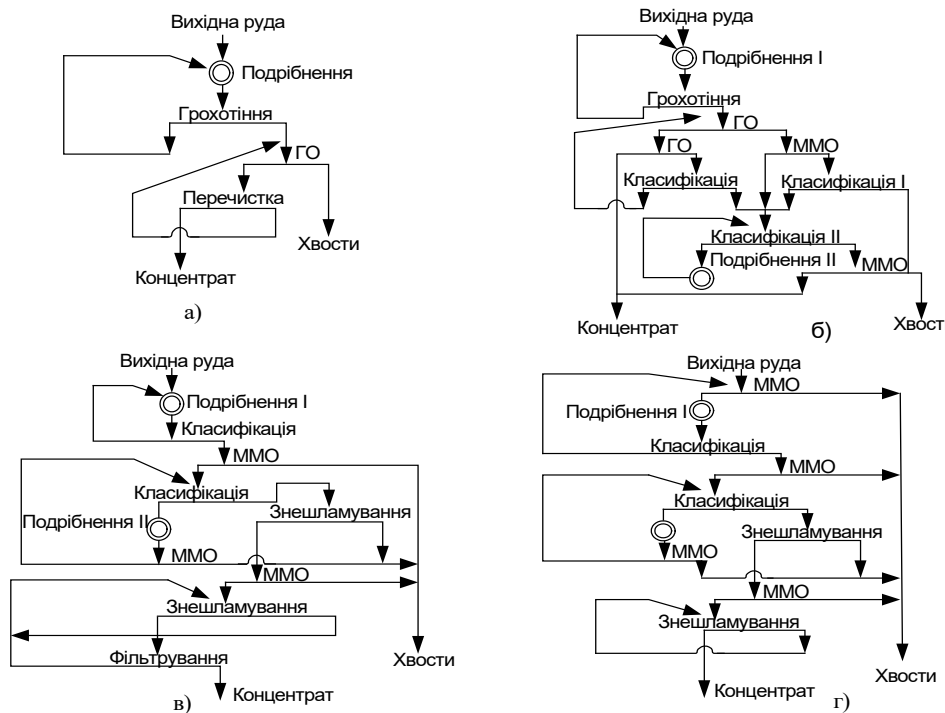


Рисунок 1 – Технологічні схеми збагачення різних типів залізних руд: а – схема гравітаційного збагачення; б – гравітаційно-магнітна схема; в – схема магнітного збагачення; г – магнітна схема з попереднім сухим збагаченням

Гравітаційно-магнітна схема (рис. 1, б) також найбільш ефективна при збагаченні дрібно- і середньовкраплених гематито-магнетитових і магнетито-гематитових руд, з більш вираженими магнітними властивостями [6].

Магнітна схема з попереднім сухим збагаченням (рис. 1, г) ефективна при збагаченні середньо- і дрібно- і середньовкраплених сілікатно-магнетитових і магнетито-сілікатних руд [6].

Принципові технологічні схеми, показані на рис. 2, д, е, застосовуються при збагаченні середньо- і дрібно- і середньовкраплених гематито-магнетитових руд, при цьому схема на рис. 2, е включає застосування методів флотації.

Схема магнітного збагачення (рис. 2, в) широко застосовується при збагаченні середньо- і дрібно- і середньовкраплених магнетитових, гематито-магнетитових та сілікатно-магнетитових руд, а також усіх структур карбонатно-магнетитових і сілікатно-карбонатно-магнетитових руд [6].

Для збагачення середньовкраплених і особливо тонковкраплених руд застосовують схеми тристадійного подрібнення, що дозволяє досягти більшої тонини помолу і краще розкрити корисний компонент. Найбільш широке застосування із них знайшли технологічні схеми магнітного збагачення та магнітні з попереднім сухим збагаченням (рис. 3, ж і з).

Останнім часом для отримання високоякісних концентратів із тонковкраплених залізних руд все частіше застосовують технологічні схеми магнітно-флотаційного збагачення, чисто флотаційного збагачення та магнітного збагачення в сильному магнітному полі (рис. 4, и, к та рис. 5, л, м), де и – магнітно-флотаційна схема з 4-стадійним подрібненням, к – магнітна із збагаченням в сильному магнітному полі [7; 10; 11].

У ряді випадків для збагачення особливо тонковкраплених залізних руд, а особливо – руд з дисперсною структурою – можуть бути ефективними схеми магнітно-флотаційного або чисто флотаційного збагачення, показані на рис. 5, л, м [13–15].

На всіх наведених вище схемах збагачення залізних руд прийняті наступні умовні позначення: ГО – гравітаційне збагачення; ВМО – високоінтенсивне магнітне збагачення; ОФ – основна флотація; ПФ – перемішувальна флотація; КФ – контрольна флотація; ММО – мокре магнітне збагачення.

Результати проведеного аналізу з вибору принципів схем збагачення залізних руд та рекомендації з їх вибору залежно від типу і структури руд наведені в таблиці 1.

Для прикладу на рис. 6 наведена схема ланцюга апаратів збагачення дрібно- і середньовкрапленої

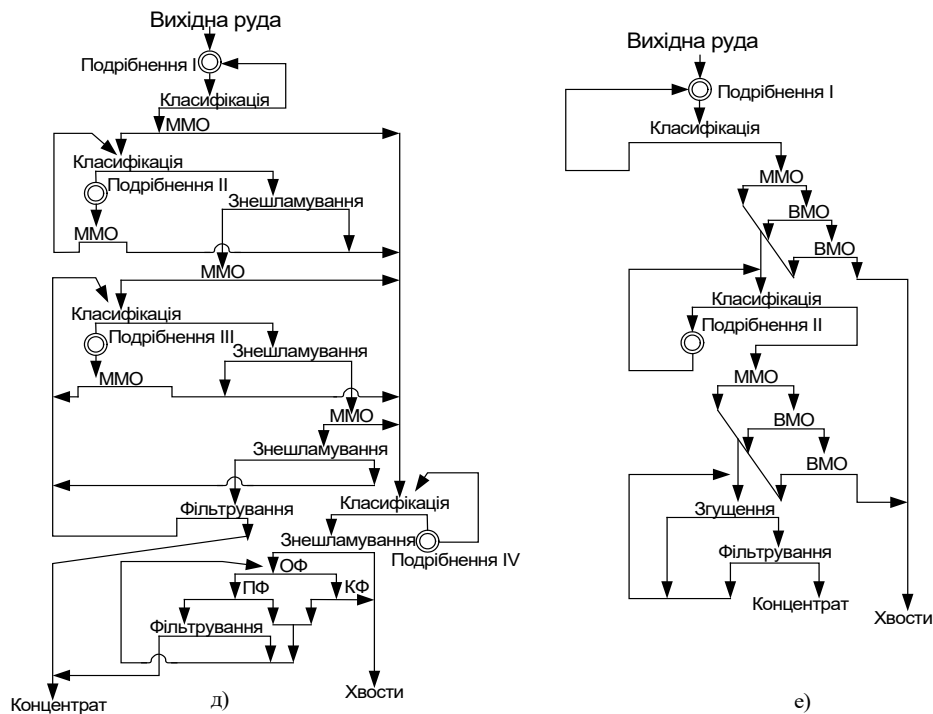


Рисунок 2 – Принципові технологічні схеми збагачення гематито-магнетитових залізних руд: д – магнітно-гравітаційна схема, е – магнітно-флотаційна схема

магнетитової залізної руди (принципова схема подана на рис. 1, в), яка застосовується на збагачувальній фабриці Інгулецького ГЗК.

Збагаченню піддається руда поточного видобутку (магнетитові кварцити), які добуваються в кар'єрі відкритим способом, з вмістом заліза

загального 32–33 % і заліза магнетитового 23–24 %. Видобута в кар'єрі руда дробиться до крупності 350-0 мм і надходить у бункери збагачувальної фабрики. З бункеру руда надходить у млини 1-ої стадії самоподрібнення ММС-70-23, які працюють у замкнутому циклі з односпіраль-

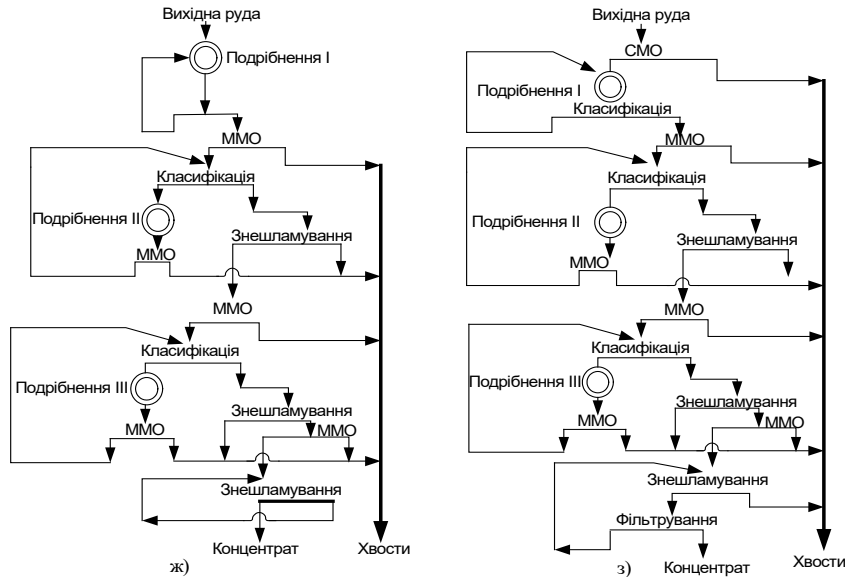


Рисунок 3 – Принципові технологічні схеми збагачення середньовкраплених і тонковкраплених залізних руд з тристадіальним подрібненням: ж – тристадіальна схема магнітного збагачення, з – тристадіальна схема магнітного збагачення з попереднім сухим збагачення

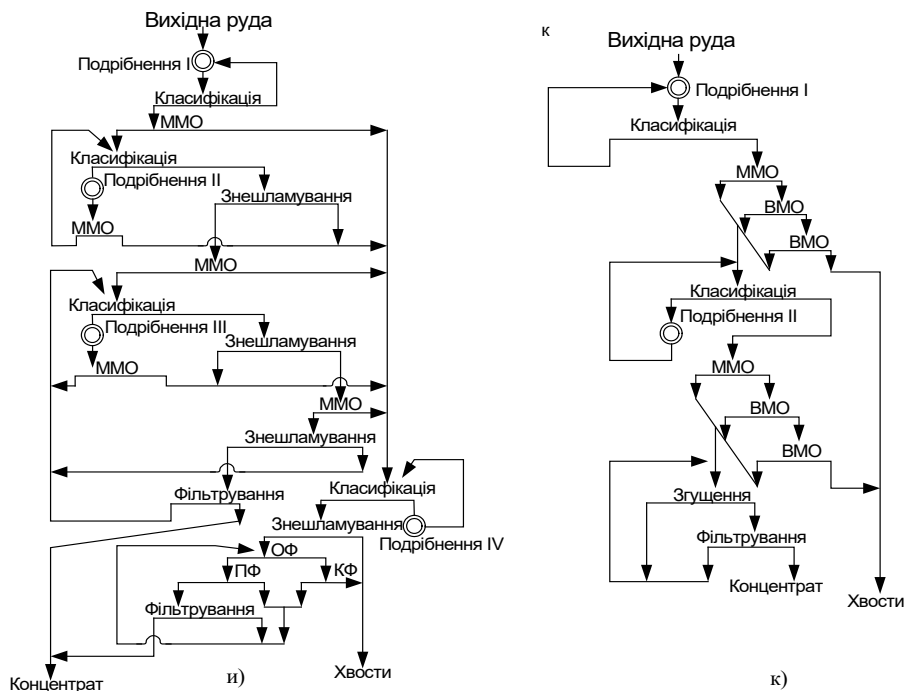


Рисунок 4 – Принципові технологічні схеми збагачення тонковкраплених залізних руд: и – магнітно-флотатійна схема з 4-х стадіальним подрібненням, к – магнітна із збагаченням у сильному магнітному полі

ними класифікаторами типу 1КСН 2,5 × 12,5, злив яких надходить у першу стадію магнітної сепарації.

Галя, яка виводиться з млина самоподрібнення ММС-70-23, надходить в 2-гу стадію подрібнення, яка здійснюється в млину рудногалечному МРГ-40-75.

Млин МРГ-40-75 оснащений металевими класифікуючими бутарами з отворами діаметром 8–15 мм. Рудногалечний млин, як і млин само-

подрібнення, працює в замкненому циклі зі спіральним класифікатором, злив якого надходить до 2-ої стадії магнітної сепарації, а скрап (піски) повертаються до млина.

**ВИСНОВКИ.** Описано методику вибору раціональної принципової схеми збагачення залізистих кварцитів для таких мінеральних різновидів руд: магнетитова; карбонатно-магнетитова; силікатно-карбонатно-магнетитова; гематито-магнетитова; силікатно-магнетитова; магне-

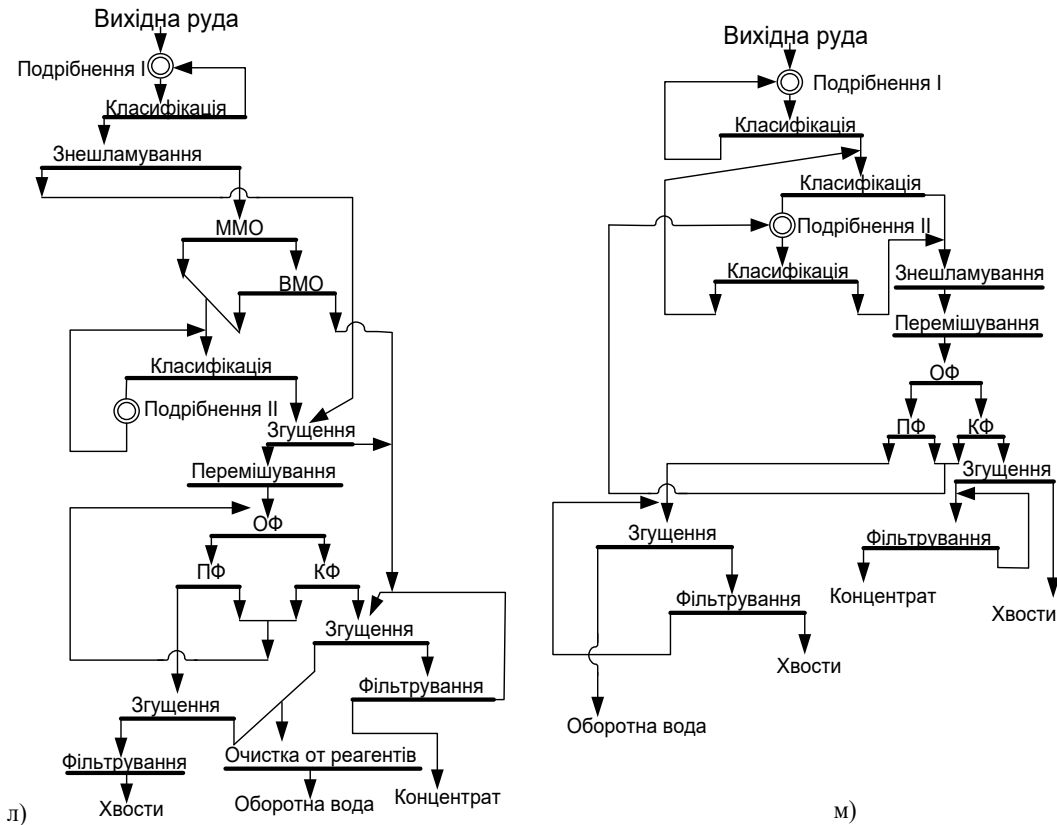


Рисунок 5 – Технологічні схеми збагачення особливо тонковкраплених залізних руд та залізних руд з дисперсною структурою: л – магнітно-флотаційна схема, м – флотаційна схема збагачення

Таблиця 1 – Вибір принципової схеми збагачення залізистих кварцитів (див. рис. 1–5, а–м)

Структура руд	Індекс структури	Схема, що рекомендується для збагачення мінеральних різновидів								
		М	КМ, СКМ	ГМ	СМ	МС	ГМр, Г	МГ	ЛМр, МЛМр	Мр, ГМр
Середнього краплення	С	в, ж	в	в, е	в, г	г	а, б, з, к	а, б	–	–
Дрібнокраплена	М	в	в	в, е	в, г	г	а, б, к	а, б	к, л	к, л
Тонковкраплена	Т <sub>1</sub>	ж	в	ж, и	ж, з	з	к, л	к, л	к, л	к, л
Тонковкраплена	Т <sub>2</sub>	ж	в	ж, и	ж, з	з	к, л	к, л	к, л	к, л
Особливо тонковкраплена	ВТ	ж	–	ж, и	ж, з	з	к, л	к, л	м	м
Дисперсна система	Д	ж	–	ж, и	ж, з	з	к, л	к, л	м	м

Примітки: М – магнетитова; КМ – карбонатно-магнетитова; СКМ – силікатно-карбонатно-магнетитова; ГМ – гематито-магнетитова; СМ – силікатно-магнетитова; МС – магнетито-силікатна; ГМр – гематито-мартитова; Г – гематитова; МГ – магнетито-гематитова; ЛМр – лімоніто-мартитова; МЛМр – магнетито-лімоніто-мартитова; Мр – мартитова.

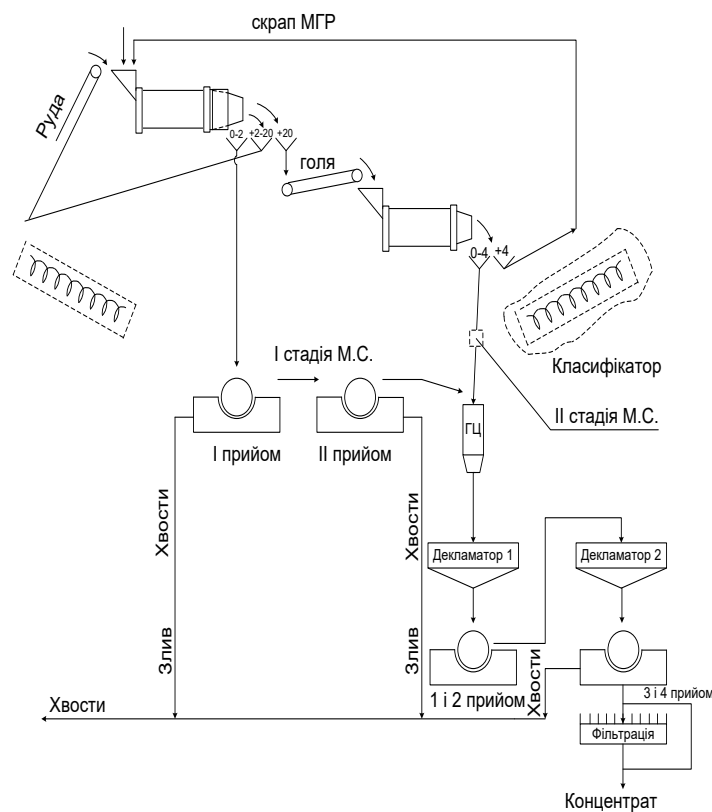


Рисунок 6 – Схема ланцюга апаратів РЗФ-2 ІнГЗК

тито-силікатна; гематито-мартитова; гематитова; магнетито-гематитова; лімоніто-мартитова; магнетито-лімоніто-мартитова; мартитова. При цьому врахована їх текстура, структура, фізико-механічні властивості, хімічний і мінералогічний склад. Запропоновано раціональні принципові схеми збагачення залізистих кварцитів в умовах гірничо-збагачувальних підприємств Криворізького залізорудного басейну. Подана раціональна схема ланцюга апаратів процесу збагачення дрібно-оврапленої магнетитової залізної руди.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Мала гірнича енциклопедія: у 3 т. / ред. В. С. Білецький. Донецьк : Донбас, 2004. Т. 1: А–К. 640 с. ISBN 966-7804-14-3.
2. IRON ORE – Hematite, Magnetite & Taconite. *Mineral Information Institute*. Retrieved on 2006-04-07. <https://web.archive.org/web/20060417160321/http://www.mii.org/Minerals/photoiron.html>
3. Білецький В. С., Суярко В. Г., Іщенко Л. В. Мінералого-петрографічний словник. Книга перша. Мінералогічний словник. Харків : НТУ «ХПІ», Київ : ФОП Халіков Р. Х., 2018. 444 с.
4. Сокур М. І., Білецький В. С., Божик Д. П. Збірник наукових праць. Кременчуц. нац. ун-т ім. М. Остроградського. Кременчук : Новабук, 2022. 294 с.
5. Сокур М. І., Білецький В. С., Ведмідь І. А., Робота Є. М. Рудопідготовка: дроблення, подрібнення, грохочення : монографія. Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2020. 494 с.
6. Кармазин В. И. Обогащение руд черных металлов. Москва : Недра, 1982. 216 с.
7. Xian Xie, Zi Xuan Yang, Xiong Tong, Ji Yong Li. Research on Exploration of Mineral Processing for a Iron Ore. *Advanced Materials Research*. 2015. Vol. 1094. Pp. 397–400. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1094.397
8. Підготовка корисних копалин до збагачення : монографія / М. І. Сокур, В. С. Білецький, О. І. Стурнов, О. М. Воробйов, В. О. Смирнов, Д. П. Божик; Кременчуцький національний ун-т ім. М. Остроградського, Академія гірничих наук України. Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2017. 392 с.
9. Смирнов В. О., Білецький В. С. Гравітаційні процеси збагачення корисних копалин : навчальний посібник. Донецьк : Східний видавничий дім, 2005. 300 с.
10. Білецький В. С., Смирнов В. О. Переробка і якість корисних копалин (курс лекцій). Донецьк : Східний видавничий дім, 2005. 324 с.
11. Смирнов В. О., Білецький В. С. Флотаційні методи збагачення корисних копалин. Донецьк : Східний видавничий дім, НТШ-Донецьк, 2010. 496 с.
12. Папушин Ю. Л., Смирнов В. О., Білецький В. С. Дослідження корисних копалин на збагачува-

ність : навчальний посібник. Донецьк : Східний видавничий дім, НТШ-Донецьк, 2006. 344 с.

13. Сокур М. І., Сокур І. М. Маркетинг енергоресурсів при збагаченні руд : монографія. Кременчук : ПП Щербатих, 2006. 300 с.

14. Сокур М. І., Білецький В. С., Смирнов В. О. Раціональні компоновальні рішення відділень подрібнення рудозбагачувальних фабрик. *Збагачення*

*корисних копалин : наук.-техн. зб.* Дніпро : ДВНЗ «НГУ», 2019. № 75 (116). С. 39–45.

15. Сокур М. І., Воробйов В. В., Аргат Р. Г., Білецький В. С., Пузир Р. Г. Удосконалення технології подрібнення магнетитових кварцитів на гірничому підприємстві. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. Кременчук : КрНУ, 2020. № 5–6 (124–125). С. 87–95.

## SELECTION OF RATIONAL PRINCIPLE SCHEME OF IRON QUARTZ ENRICHMENT

### Mykola Sokur

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Professor at the Department of Marketing

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20 Pershotravneva str., Kremenchuk, Poltava region, Ukraine, 39600;

**ORCID: 0000-0001-6779-3293**

### Roman Argat

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20 Pershotravneva str., Kremenchuk, Poltava region, Ukraine, 39600, argat.rg@gmail.com;

**ORCID: 0000-0001-9247-5297**

### Volodymyr Biletskyi

Doctor of Technical Sciences, Professor

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20 Pershotravneva str., Kremenchuk, Poltava region, Ukraine, 39600, ukcdb@i.ua;

**ORCID: 0000-0003-2936-9680**

### Vita Ravinska

Head of the Testing Center

FERREXPO POLTAVA MINING, 16 Budivelnkyiv str., Horishni Plavni, Poltava Region, Ukraine, 39802;

**ORCID: 0000-0003-3040-3938**

Iron ore is the main industrial mineral raw material for the production of iron and steel. The recent increase in iron ore mining is due to their poor varieties, which require highly efficient dressing in preparation for metallurgical processing. carbonate-magnetite; silicate-carbonate-magnetite; hematite-magnetite; silicate-magnetite; magnetite-silicate; hematite-martite; hematite; magnetite-hematite; limonite-martite; magnetite-limonite-martite; martite. To select a rational basic scheme of dressing of ferrous quartzites, the analysis of technological schemes of dressing of ferrous quartzites was performed taking into account their texture, structure, physical and mechanical properties, chemical and mineralogical composition. As a result, rational schemes of their dressing were chosen for certain mineral varieties and structures of ferruginous quartzites. The following main structures of ore are distinguished: The following main structures of ore are distinguished: medium inclusions (structure index C), fine-grained (structure index M), fine-grained (structure index T<sub>1</sub>), finely interspersed (structure index T<sub>2</sub>), especially fine-grained (index structure of VT), dispersed system (index of structure D). In the process of analysis the method of selection of rational technological schemes of beneficiation of mineral varieties of iron ores is improved, which is offered for application in the conditions of domestic mining and processing enterprises, in particular, Kryvyi Rih iron ore basin.

**Key words:** ferrous quartzites, iron ore dressing, technological dressing schemes, texture, structure, physical and mechanical properties, chemical and mineralogical composition of ores.

REFERENCES

1. Biletsky, V. S. (2004). Mala hirnycha entsyklopediya [Small mining encyclopedia] in 3 volumes. ed. V. S. Biletsky., Vol. 1. *Donbas*. Donetsk, 640 p. [in Ukrainian]. ISBN 966-7804-14-3.
2. IRON ORE – Hematite, Magnetite & Taconite. *Mineral Information Institute*. Retrieved on 2006-04-07. [in English]
3. Biletsky, V. S., Suyarko, V. G., Ishchenko, L. V. (2018). Mineraloho-petrografichnyy slovnyk. Knyha persha. Mineralohichnyy slovnyk [Mineralogical and petrographic dictionary. Book one. Mineralogical dictionary]. *NTU “KhPI”*. Kharkiv. *FOP Khalikov RH*. Kyiv, 640 p. [in Ukrainian]
4. Sokur, M. I., Biletsky, V. S., Bozhyk, D. P. (2022). Zbirnyk naukovykh prats [Collection of scientific works]. *Nova buk*. Kremenchuk, 294 p. [in Ukrainian]
5. Sokur, M. I., Biletsky, V. S., Vedmid, I. A., Robota, Ye. M. (2020). Rudopidhotovka: droblennya, podribnennya, hrokhochennya : monohrafiya [Ore preparation: crushing, crushing, screening : monograph]. *PP Shcherbatykh OV*. Kremenchuk, 494 p. [in Ukrainian]
6. Karmazin, V. I. (1982) Obogashcheniye rud chernykh metallov [Enrichment of ores of ferrous metals]. *Nedra*. Moscow, 216 p. [in Russian]
7. Xian, Xie, Zi, Xuan Yang, Xiong, Tong, Ji, Yong Li. Research on Exploration of Mineral Processing for a Iron Ore. *Advanced Materials Research*. 2015. Vol. 1094. Pp. 397–400. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1094.397 [in English]
8. Sokur, M. I., Biletsky, V. S., Yehurnov, O. I., Vorobyov, O. M., Smyrnov, V. O., Bozhyk, D. P. (2017). Pidhotovka korysnykh kopalyn do zbahachennya : monohrafiya [Preparation of minerals for enrichment : monograph]. *Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Academy of Mining Sciences of Ukraine*. *PP Shcherbatykh OV*. Kremenchuk, 392 p. [in Ukrainian]
9. Smyrnov, V. O., Biletsky, V. S. (2005). Hravitatsiyni protsesy zbahachennya korysnykh kopalyn : navchalnyy posibnyk [Gravitational processes of mineral enrichment : a textbook]. *Eastern Publishing House*. Donetsk, 300 p. [in Ukrainian]
10. Biletsky, V. S., Smyrnov, V. O. (2005). Pererobka i yakist korysnykh kopalyn (kurs lektsiy) [Processing and quality of minerals (lecture course)]. *Eastern Publishing House*. Donetsk, 324 p. [in Ukrainian]
11. Smyrnov, V. O., Biletsky, V. S. (2010). Flotatsiyni metody zbahachennya korysnykh kopalyn [Flotation methods of mineral beneficiation]. *Eastern Publishing House, NTSh-Donetsk*. Donetsk, 496 p. [in Ukrainian]
12. Papushin, Yu. L., Smirnov, V. O., Biletsky, V. S. (2006). Doslidzhennya korysnykh kopalyn na zbahachuvanist : navchalnyy posibnyk [Research of minerals for enrichment : a textbook]. *Eastern Publishing House, NTSh-Donetsk*. Donetsk, 344 p. [in Ukrainian]
13. Sokur, M. I., Sokur, I. M. (2006). Marketynh enerhoresursiv pry zbahachenni rud : monohrafiya [Marketing of energy resources in ore beneficiation : monograph]. *PP Shcherbatykh OV*. Kremenchuk, 300 p. [in Ukrainian]
14. Sokur, M. I., Biletsky, V. S., Smyrnov, V. O. (2019). Ratsionalni komponuvalni rishennya viddilen podribnennya rudozbahachuvalnykh fabryk [Rational layout solutions of crushing departments of ore-dressing factories]. *Enrichment of minerals: scientific and technical. coll. DVNZ “NHU”*. Dnipro, issue 75, pp. 39–45. [in Ukrainian]
15. Sokur, M. I., Vorobyov, V. V., Arhat, R. H., Biletsky, V. S., Puzyr, R. H. (2020). Udoskonalennya tekhnolohiyi podribnennya mahnetytovykh kvartsytiv na hir-nychomu pidpryemstvi [Improving the technology of grinding magnetite quartzites at the mining enterprise]. *Bulletin of the Mykhailo Ostrohradsky KrNU*. Kremenchuk, issue 5–6 (124–125), pp. 87–95. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 27.05.2022