

внаслідок цього виникає істотна відмінність у зміщенні віял провідників і діелектриків при різній напрузі без зниження продуктивності сепаратора.

#### Список літератури

1. Попков В. И. Кинетика зарядки и динамики волокон в электрическом поле / В.И. Попков, М. И. Глазов. - М., Наука, 1976.
2. Плаксин Н.Н. Сепарация тонковкрапленных железных руд электрическим и сухим магнитным методом / Н.Н. Плаксин, Н.Ф. Олофинский. - М.: Наука, 1966, 205 с.
3. Олофинский Н. Ф. Трибоадгезионная сепарация / Н. Ф. Олофинский, Новикова В. А. М., Наука, 1974.
4. Олофинский Н. Ф. Электрические методы обогащения. М., Недра, 1977.
5. Верещагин И.П. Основы электрогазодинамики дисперсных систем / И. П. Верещагин, В. И. Левитов, Г. З. Марзабекян, М. М. Пашин. - М.: Энергия, 1974. 321 с.
6. Верещагин И.П. Динамика дисперсных систем. - М.: Недра, 1977, 305 с.
7. Ангелов А.И. Движение заряженных частиц в электрическом поле коронно-электростатическом поле коронно-электростатического барабанного сепаратора / А.И. Ангелов, В.С. Ершов, С.И. Лосаберидзе. - Электронная обработка материалов. 1978, № 4, с. 45 - 50.
8. Ангелов А.И. Электростатические сепараторы свободного падения / А.И. Ангелов, Ю.Н. Набиулин. М., Недра, 1970.
9. Карнаузов Н. М. Технология доводки коллективных концентратов с помощью электрической сепарации. М., Недра, 1966.
10. Месеняшин А. И. Электрическая сепарация в поле короны чередующейся полярности. - Электронная обработка материалов. 1978, № 6 (78), с. 83 - 85.
11. Месеняшин А. И. Электрические силы при электросепарации по проводимости. - Обогащение руд, 1976, № 3, с. 15 - 19.
12. Ralson O.C. Electrostatic separation of mixed granular solids. - Amsterdam: Elsevier. - 1961.
13. Lawer J.E., Derenforth W.P. Electrostatic separation / Electrostatic and its applications ed A.D.Moore. - New York: Wiley. - 1973. - PP. 221-249.
14. Knoll F.S., Lawer J.E., Taylor J.E. Electrostatic separation. / Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 5th edn.- Weinheim: VCH. - 1988. - Vol. B2. - PP. 20-1-20-11.

Рукопис подано до редакції 24.03.14

УДК 622.7: 622.765.06

М.О. ОЛІЙНИК, аспірант, А.І. МАКАЧОВА, студентка  
Криворізький національний університет

### УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗБАГАЧЕННЯ ГРАФІТОВОЇ СИРОВИНИ ЗАВАЛЛІВСЬКОГО РОДОВИЩА

Статтю присвячено проблемі переробки бідних графітових руд Заваллівського родовища. В статті проведено аналіз розроблених та впроваджених технологій збагачення графітової сировини, за якими виявлені переваги і недоліки розглянутих технологій збагачення графітових руд. В результаті дослідження обрана оптимальна схема збагачення графітових руд. Досліджено мінералогічний та хімічний склад досліджуваної проби графітового гнейсу Заваллівського родовища. Відмічено вплив ступеню подрібнення графітової руди на її флотуємість в умовах реагентного режиму Заваллівського комбінату. Приведено результати досліджень закономірностей зміни показників флотації при зміні витрат реагентів (соди, рідкого скла, керосину та Т-66). Встановлено оптимальний реагентний режим, за яким значно підвищується якість концентрату. Надано результати збагачення графітової руди за обраною схемою та при встановленому реагентному режимі.

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** По запасам графітової сировини Україна займає одне з провідних місць у світі. Сьогодні Україна виробляє графітову продукцію, що достатня як для місцевих потреб, так і для експорту. Графітова товарна продукція є досить дорогою сировиною і в залежності від її чистоти вартість може коливатися від 1,5 до 10 тис. у.о. за одну тону. Отримання більш якісних графітових концентратів, змушує продуцентів модернізувати свої технологічні схеми, шукати можливість їх вдосконалення або введення додаткових способів обробки.

За рахунок того, що запаси багатих графітових руд практично вичерпані, не втрачає актуальності питання залучення в переробку бідних графітових руд. Так, технологія флотаційного збагачення графітової сировини Заваллівського родовища, що включає основну флотацію графіту і три-п'ять перемісток пінного продукту флотації, не дозволяє з бідних руд отримувати

високоякісний графітовий концентрат, який відповідав би вимогам споживачів. Тому удосконалення технології збагачення графітового сировини, що дозволить підвищити якість графітового концентрату з бідних руд є досить актуальним науково-практичним завданням.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Для вирішення мети наукового дослідження, яке б дозволило вивчити поставлене завдання, необхідно розглянути особливості процесу флотації графітової сировини. Флотаційний спосіб збагачення графітових руд є найбільш поширеним. Він заснований на природній гідрофобності, тобто на незмочуваності водою поверхні лусочок графіту. Тому графіт, як природно-гідрофобний матеріал, може бути вилученим у піну з застосуванням тільки одного вспінювача.

Гідрофобність графіту залежить від дисперсності структури мінералу. Наприклад, лускуватий графіт володіє найбільшою флотуємостю, приховано-кристалічний – меншою [1]. Слід відзначити, що переважання ненасичених молекулярних зв'язків по площинах спайності полегшує флотацію графіту аполярними агрегатами.

Для отримання більш високих технологічних показників (вилучення графіту, виходу концентрату та вмісту вуглецю у концентраті) флотацію графіту проводять з використанням збирача (керосин та інші неіоногенні збирачі) та вспінювача (соснове масло, а в промислових умовах реагент «оксал» марки Т-80, диетілгексанол) при рН 8,5-9 [2]. Простий склад реагентної суміші забезпечує задовільну вибірковість флотації у відношенні силікатів та окислів, до яких відносяться більшість мінералів пустої породи в графітових рудах. За умови високої кількості пустої породи використовують рідке скло, що є депресором силікатних мінералів.

У [3] розроблено технологічну схему, яка включає в себе подрібнення до 60-80 % класу - 0,071 мм, основну флотацію, контрольну флотацію, перемішувальну флотацію з попереднім подрібненням до 90-95 % класу - 0,071 мм. За такою схемою можна отримати концентрат з вмістом графіту 60% при вмісті графіту у вихідній руді від 2 до 15 %. Недоліками схеми є низька якість кінцевої продукції.

У [4] запропоновано схему, що включає в себе дроблення у стержневих млинах, основну флотацію з подрібненням пінного продукту в шаровому млині та дві перемішувальні. За результатами основної флотації, з вмістом вуглецю у вихідній руді 11,2 %, був отриманий концентрат виходом 19,38% з вмістом вуглецю 65,9 % та вилученням 89,74 %. При першій перемішувальній досягається підвищення вуглецю до 79,55 % з виходом 15,70 % та вилученням 87,93 %. Друга перемішувальна дає підвищення вуглецю до 86,16 %, вихід 14,40 % та вилученням 87,24. Результати були отримані при флотації у більш м'якій воді. При проведенні збагачення за цією схемою у жорсткій воді зменшилась ефективність процесу та підвищилась зольність концентрату. Перевагами схеми є подрібнення концентрату основної флотації, що надає змогу отримати більш високі результати розділення без надлишкових витрат на подрібнення усієї руди. До недоліків цієї технології слід віднести високу залежність кінцевих показників флотаційної переробки графітової сировини від жорсткості води.

У роботі [5] надана типова схема флотації руди лускуватого графіту з шестикратним перемішуванням та трьохкратним подрібненням чорного концентрату. Подрібнення концентрату велось після I, III і V перемішувальних. З промпродуктів зольністю 82,8 % був отримано концентрат зольністю 7,5 %. Для поліпшення процесу флотації проводився випал карбонатів з невеликою кількістю повітря. Для флотації характерні підвищені витрати збирача - до 1,5-2,5 кг/т, що в свою чергу пояснюється великою площею поверхні такого графіту, який потребує досить тонкого подрібнення. До переваги схеми належить отримання малозольного високоякісного концентрату, високу ефективність процесу розділення графіту та породних мінералів, за рахунок розкриття їх зростків перед перемішувальною та випалу карбонатів. Недоліком такої схеми є досить високі витрати реагентів та електроенергії для та випалу, що тягне за собою підвищення собівартості товарної продукції.

У роботі [6] технологією збагачення передбачено одно-стадійне дроблення руди з вмістом графіту 20-25 % в замкненому циклі з грохотом, подрібнення в головному стержневому млині та п'яти кулькових млинах і флотація в 12 стадій з використанням реагентів – збирача (керосина) та регулятора середовища (сода), вспінювача (флотомасло). У результаті такої технології збагачення отримують графітовий концентрат зольністю 5-6 % при вилученні 95 %. Недоліком цієї технології є апаратурна складність схеми збагачення сировини та значні затрати електроенергії за рахунок великої кількості перемішувальних операцій та подрібнень.

У роботі [7] запропоновано після основної флотації чорновий концентрат піддавати перечистці у шість послідовних етапів з двома проміжними операціями подрібнення. В якості збирача використовують солярне масло. У результаті було отримано концентрат з вмістом вуглецю 96,3% та низьким вмістом золи 3,7 %. Така схема відрізняється простотою, але може бути застосована тільки для збагачення крупно лускуватого графіту.

У роботі [8] досліджувався вплив деяких 1,3-диоксидів на флотацію графітових руд та методом ІЧ-спектроскопії вивчалась їх донорна властивість. Надана технологічна схема, включала в себе подрібнення до 70 % класу -0,071 мм, основну флотацію, контрольну флотацію, перечисну флотацію з попереднім подрібненням до 95 % класу -0,071 мм. За такою схемою можна отримати концентрат з вмістом графіту 91,9 % при вмісті графіту у вихідній руді 3,6 %. До переваг запропонованої схеми можна віднести кращу ефективність процесу розділення графіту та породних мінералів, і як, наслідок отримання більш чистих продуктів. Недоліками схеми є підвищені витрати електроенергії.

Для підвищення якості кінцевих графітових концентратів в технологіях збагачення графітової сировини крім флотації, застосовують гравітаційну, магнітну сепарації та хімічне доведення концентратів до марок найвищих сортів [9-12].

Сьогодні графітова сировина в промислових умовах перероблюється з застосуванням комбінації різних методів збагачення.

Так, на фабриці «Саутуестерн грэфайт», США [13] впроваджена технологія, за якою вихідна руда, що містить лускуватий графіт з вмістом вуглецю 4,5-5%, подається на подрібнення у замкненому циклі з контрольною класифікацією. Дрібний продукт далі направляється на основну флотацію. Отриманий пінний продукт піддається подрібненню з попередньою класифікацією. Злив класифікації, після двох перечисток, підлягає гравітаційній сепарації на концентраційному столі. Графітовий концентрат, далі розділяється на різні товарні марки. Флотаційне збагачення дозволяє отримати концентрат з вмістом вуглецю 96-97%. Слід відзначити, що така технологія є ефективною лише для графітів лускуватого типу, з глинистими домішками, і непридатною для графітових руд з металічними включеннями.

Заваллівська збагачувальна фабрика (Україна) сьогодні працює на рудах кристалічного графіту Заваллівського родовища. Схема їх збагачення включає: стадійне дроблення, подрібнення до 50-60 % класу -0,074 мм, класифікацію, стадіальну флотацію з перечисненням пінного продукту (9 операцій) та подрібненням концентрату, мокру класифікацію, сушку і суху класифікацію. Отриманий концентрат містить 99,95 % вуглецю. Крім того, на Заваллівському графітовому комбінаті для отримання графітової продукції з зольністю менше 0,1% застосовується термохімічний метод доводки флотоконцентратів [12].

**Постановка завдання.** Для розширення сировинної бази Заваллівського комбінату необхідно в переробку застосовувати біотит-гранатові гнейси, що мають перемінний мінеральний склад та відрізняються невеликим вмістом графіту. Тому в роботі поставлена основна мета дослідження - удосконалення технології збагачення графітової сировини Заваллівського родовища.

**Викладення матеріалів та результати.** На дослідження поступила проба графітового гнейсу, яка в Заваллівському родовищі переважно представлена чергуванням смужок і лінз різного мінерального складу графіту та біотиту.

Іноді в гнейсі зустрічаються ділянки складені великими агрегатами кварц-польовошпатового складу розміром до 0-15 мм, в яких розміщуються орієнтовані по сланцюватості скупчення лусочок графіту.

При вивченні речовинного складу та технологічних властивостей мінералів проб графітових і гранатових гнейсів було застосовано макроскопічний і мікроскопічні методи дослідження зразків кернавого матеріалу, шліфів і при-шліфовок, а також мономінеральних фракцій для визначення вмісту графіту, граната та інших мінералів, термічний аналіз на установці УТА-1 з хромель-алюмелевої термопарою (час нагріву 15 хв. до 1000°C, еталон - проколений  $Al_2O_3$ ), хімічний і спектральний аналізи графітових гнейсів і виділених з них мономінеральних фракцій, флотаційні дослідження, що проводилися в лабораторній флотомашині типу ФМ-1М з робочим об'ємом камери 1 л. і 0,5 л. при швидкості обертання імPELLеру в процесі перемішування пульпи з реагентами 1300 об/хв, при флотації - 1800-2200 оберт/хв.

Вміст вуглецю графітового в хвостах і в продуктах флотації визначались за методикою, що полягає в кислотному розчині розкладанні карбонатів і силікатів, фільтруванні та спалюванні

твердого залишку в потоці кисню. За кількістю утвореної вуглекислоти розраховували вміст графіту [14].

Для планування флотаційних експериментів та розробки оптимального реагентного режиму застосовувався метод латинських квадратів та методу випадкового балансу [15].

При виконанні досліджень було вивчено вплив витрат соди, рідкого скла, керосину і Т-66 на показники процесів основної і перечисної флотації графіту з урахуванням взаємного впливу на процес кожного з зазначених реагентів.

При макроскопічному дослідженні проби графітового гнейсу в зразках, крім графіту і біотиту, помітні кварц, польовий шпат, гранат, рідше сульфідні (пірит, піротин).

Детальними дослідженнями шліфів і штучних шліхів графітової руди встановлено в невеликій кількості корціерид, сидерит, магнетит, циркон, рутил, хлорид, силіманіт, апатит, турмалін.

На підставі мікроскопічного вивчення щільної графітової руди в шліфах визначено, що вона має сланцевату текстуру, ліпідогранобластову структуру.

Головні мінерали: кварц, становить від 30-40%, ортоклаз 16-20%, біотит 6-18%, плагіоклаз 5-10%, графіт 5-9%, гранат 0-10%.

Другорядні мінерали представлені піротином, піритом, сидеритом, зміст яких становить 0,5-5%.

Акцесорними мінералами є магнетит, рутил, апатит, циркон, турмалін, силіманіт.

Зрідка зустрічаються барит, вторинні мінерали - хлорид, серицит, глинисті мінерали.

В результаті аналізу хімічного складу проби встановлено, що вміст вуглецю складає 7,93%, відношення  $K_2O/Na_2O$  дорівнює 1,78.

Слід відзначити в пробі порівняно високий вміст сульфідної сірки, який обумовлений присутністю у пробі значної кількості сульфідів.

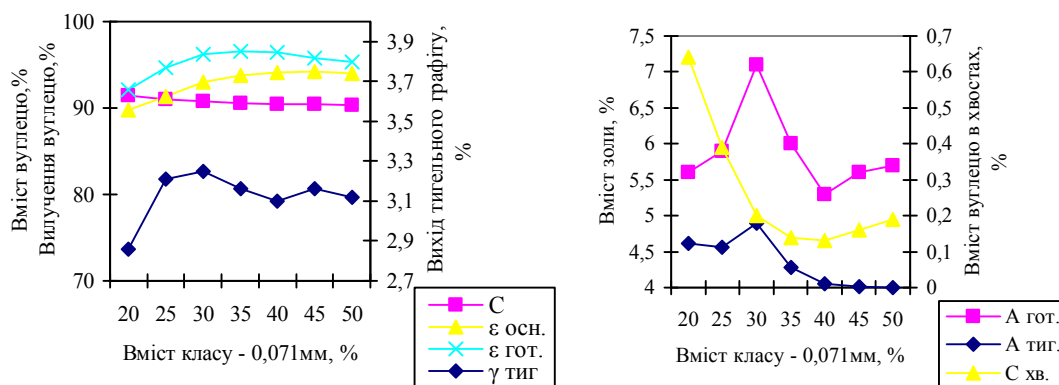
Чітко виражена перевага калію у вмісті лугів, так як відношення  $K_2O/Na_2O$  дорівнює 1,78.

При виконанні спектрального аналізу у вихідній руді виявлено підвищену кількість міді, нікелю, кобальту і срібла, що в значній мірі обумовлено дуже високим вмістом цих елементів у сульфідах, які складають понад 8 % всієї графітової руди.

Для визначення оптимального ступеня подрібнення руди була поставлена серія експериментів з різною тривалістю подрібнення вихідної руди перед флотацією в умовах такого режиму: витрата рідкого скла - 2 кг/т, керосину - 0,56 кг/т (рідке скло і керосин подаються в подрібненні), Т-66 - 0,20 кг/т, тривалість агітації - 1 хв; тривалість основної флотації і кожної з п'яти перечисток - 5 хв; тривалість подрібнення концентрату першої перечистки - 25 хв.

Відношення Т:Ж при подрібненні – 1:1, кульове навантаження млина – як на вихідній руді.

Результати основної флотації та перечишень (кількість 5) пінного продукту цієї серії досліджень надано на рис. 1.



**Рис. 1.** Залежність показників збагачення графітової руди від вмісту класу мінус 0,071 мм в руді після подрібнення: С – вміст вуглецю в готовому концентраті;  $\epsilon_{осн.}$  – вилучення вуглецю в концентрат основної флотації;  $\epsilon_{гот.}$  – теж саме в готовий концентрат;  $\gamma_{тиг.}$  - вихід тигельного продукту;  $A_{гот.}$  - вміст золи в готовому концентраті;  $A_{тиг.}$  - теж саме в тигельному продукті;  $C_{хв.}$  – вміст вуглецю в хвостах;

Аналіз результатів досліджень (див. рис.1) показав, що оптимальною є крупність подрібнення руди перед флотацією з вмістом класу -0,071 мм 40 %.

При такому подрібненні можливо досягнути найвище вилучення графіту в концентрат основної флотації і в готовий концентрат (відповідно 98,51 і 95,90 %) і найменшу зольність готового концентрату і тигельного продукту (відповідно 5,42 і 4,04 %).

Вихід тигельного продукту при такому подрібненні складає понад 3,1 %.

На наступному етапі досліджень було встановлено вплив регентів з різними витратами на процес флотації (рис. 2-5).

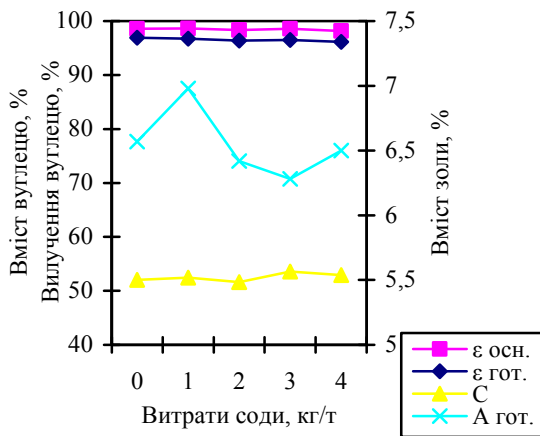


Рис. 2. Залежність показників флотації руди від витрат соди

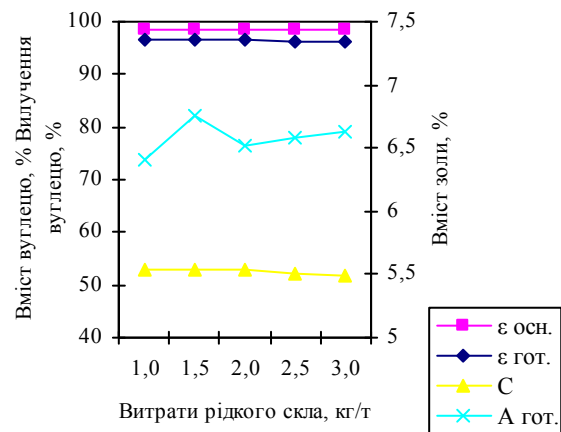


Рис. 3. Залежність показників флотації руди від витрат рідкого скла

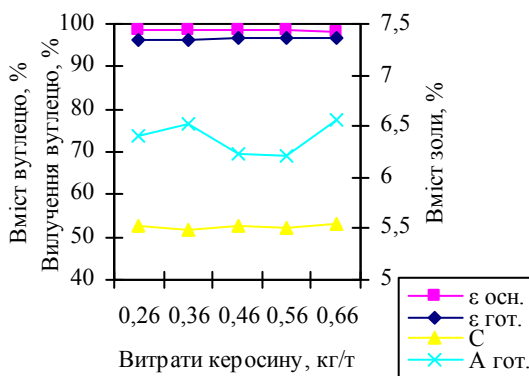


Рис. 4. Залежність показників флотації руди від витрат керосину

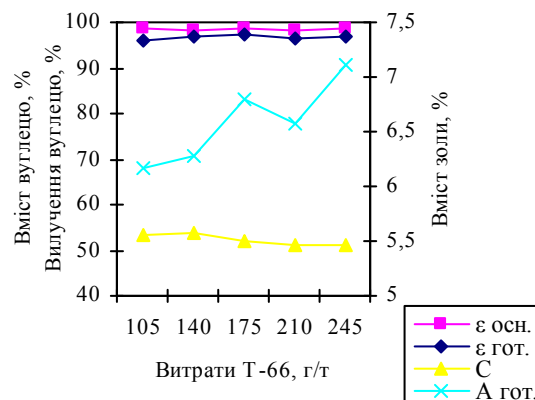


Рис. 5. Залежність показників флотації руди від витрат Т-66

Аналіз результатів досліджень показав, що процес флотації доцільно виконувати при рН 7-7,5. Цей показник може бути досягнутим і без додавання соди. Додавання соди підвищує рН до 8-8,2, що покращує якість концентрату основної флотації, але знижує вилучення графіту при наступних переочищеннях. Тому флотацію можна проводити без додавання соди.

Збільшення витрати рідкого скла з 1 до 3 кг/т не надає суттєвого впливу на флотацію графіту (див. рис 3). Оптимальним можна вважати його витрати 1кг/т. Керосин при мінімальних витратах (0,26 кг/т) забезпечує отримання високих показників основної флотації та переочищень пінного продукту (див. рис.4). Збільшення його витрати до 0,56 кг/т призводить до деякого зниження вилучення графіту в основній флотації та підвищення вилучення його в готовий концентрат. При вивченні залежності показників флотації руди від витрат вспінювача виявлено, що Т-66 надає найбільший вплив на кінцеві показники флотації графіту (див. рис. 5). За оптимальний слід прийняти витрати Т-66 – 140 г/т. Це підтверджується також результатами дисперсійного аналізу.

При проведенні контрольних експериментів з флотації в умовах оптимальних витрат реагентів у відкритому циклі отриманий готовий концентрат з вмістом вуглецю 93,39% і золи

6,22% при вилученні вуглецю 96,94%. Вихід концентрату склав 8,04%; вихід тигельного продукту - 3,30% з зольністю 4,33%. При скороченні кількості перечисток концентрату до трьох зольність готового концентрату підвищується до 8,19% при деякому збільшенні вилучення графіту. Результати цих дослідів свідчать про стабільність процесу флотації графіту з досліджуваної руди. В результаті проведених досліджень доведена можливість підвищення якості концентрату на 1,2% та зменшення зольності на 0,99%.

**Висновки і напрямки подальшого дослідження.** Для збагачення бідної графітової сировини Заваллівського родовища прийнята технологічна схема, яка включає основну флотацію, що знаходиться у замкнутому циклі з п'ятьма перечистками промпродуктів і подрібненням концентрату першої перечистки при оптимізованих витратах рідкого скла 1 кг/т, керосину 0,26 кг/т і Т-66 0,14 кг/т, що дозволяє з руди з вмістом вуглецю 7,93 % отримано графітовий концентрат з вмістом вуглецю 93,39% і золи 6,22% при вилученні вуглецю 96,94%.

#### Список літератури

1. Разумов К.А. Флотационный метод обогащения. Л.: ЛГУ, - 1975.
2. Смирнов В.С., Білецький В.С. Флотаційні методи збагачення корисних копалин. Донецьк: Східний видавничий дім – 2010.
3. Лабораторные методы исследования графитовых руд: Обзор/ А.Ф.Николаев, О.Ш.Аронскинд, Л.А.Свстигнесва, Н.Г.Худяков. – М., 1985.
4. Обогащение графитов СССР, 1932.
5. Абдурахманов Э.А., Донияров Н.А., Курс лекций по предмету «Технология обогащения нерудных полезных ископаемых», Навои – 2008.
6. Графиты Штирии(переклад №51556/5 з німецької мови), Книги Клара, 1964.
7. Лузин В.П. Комплексные минералого-технологические исследования графитовых руд месторождения Чебере в республике Саха(Якутия)/Лузин В.П., Вафин Р.Ф., Пермьяков Е.Н., Кузнецов О.Б., Лузина Л.П., Губайдуллина А.М., Кузнецова В.Г., Ахиярова А.В.//ФГУП «ЦНИИгеолнеруд», г Казань, 2009.
8. Розинов А.І. Графитообогатительная фабрика. М. – Л. 1933.
9. Євтехов В.Д., Олійник Т.А., Кулаков Є.В. Пошук оптимальної технології збагачення графіт-вмісного пилу.//Вісник КТУ, 2003.
10. Разработка технологии и организации производства графита з графіт содержащей пыли металлургических производств: Отчет по НИР/ин-т Механообрчермет: руководитель работы Ю.А.Витовтов, Т.В.Дендюк, - 1315-90,- Кривой Рог, 1991.
11. Исследовательские возможности использования графит содержащей пыли металлургического производства для получения товарных марок графита в условиях ЗГК: Отчет/Завальевский комбинат: Руководители работы Н.Н.Заяц, В.Л.Хавин, Т.К.Левченко. – Завалье, 1982.
12. Олейник Т.А. Химическое обогащение графит содержащих продуктов / Олейник Т.А., Дзюба О.И., Харитонов В.Н., Кулаков Е.В. // Наукові праці Донецького національного університету. Донецьк, 2008. – вип. 15(131). – С. 139-151.
13. Томило В.М. Природный графит за рубежом, 1979.
14. Архипов В.С. Определение углерода и водовода в твердых горючих ископаемых. Томск: узд. ТПУ, 2010.
15. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологи. Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. Шк., 1985.

Рукопис подано до редакції 24.03.14

УДК 622.7: 622.34

Л.В. СКЛЯР, канд.техн.наук, доц., О.А. САМОЙЛЮК, магістрант  
Криворізький національний університет

## АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЇ ЗБАГАЧЕННЯ БУРОЗАЛІЗНЯКОВИХ РУД У ВІТЧИЗНЯНІЙ І ЗАРУБІЖНІЙ ПРАКТИЦІ

Виконано аналіз розроблених та введених до експлуатації технологій збагачення бурозалізнякових руд в Україні та за її межами. Виявлені найбільш прогресивні технологічні рішення в схемах збагачення, що використовуються. Визначені основні напрямки подальших досліджень і конструктивних розробок.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** На даний час Україна займає одне з провідних місць у світовому балансі залізородної сировини за запасами, виробництвом, споживанням та експортом продукції. Світові розвідані запаси залізних руд склада-