

УДК 669.046: 662.778.

**В.И. Килин, Э.К. Якубайлик, С.В. Килин**

## **ЦИФРОВАЯ ФОТОГРАФИЯ – ОПЕРАТИВНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ СИЛЬНОМАГНИТНЫХ РУД**

*Приведены результаты изучения процессов намагничивания (флокуляции) и размагничивания (дефлокуляции) сильномагнитных продуктов Абагурской обогатительной фабрики методом цифровой фотографии. Наблюдалась как «наведенная» внешним полем флокуляция, так и «остаточная» – за счет остаточной намагниченности. Поле в 40 кА/м. можно считать оптимальным как для намагничивания, так и для размагничивания сильномагнитных продуктов.*

*Ключевые слова: флокуляция, дефлокуляция, цифровая фотография, сильномагнитные руды.*

### **Введение**

**П**редварительная магнитная обработка тонковкрапленных сильномагнитных руд применяется в технологических схемах мокрого обогащения несколько десятилетий.

Намагничивание пульпы во внешнем магнитном поле или за счет остаточной намагниченности ведет к образованию агрегатов-флокул – флокуляции – с ростом их намагниченности, повышению производительности сепаратора и извлечения концентрата, однако препятствующему классификации материала.

Размагничивание пульпы в переменном магнитном поле – дефлокуляция – разрушает флокулы, способствуя (активируя) разделению частиц по крупности.

В последние годы использование названных процессов в обогатительной практике возросло (расширилось) в связи с вовлечением в переработку бедных тонковкрапленных руд и внедрением в технологию операций тонкого грохочения.

Процессы магнитной флокуляции и дефлокуляции пульпы традиционно (по литературе) изучаются методом осажде-

нием разделением на слив и пески; методом трудоемким, кропотливым и длительным по времени [1]. Метод «косвенный», сами процессы флокуляции – дефлокуляции не наблюдаются, фиксируется результат – массы слива и песков. Таким образом, очевидна потребность в современном оперативном методе наблюдения процессов флокулообразования и разрушения. На наш взгляд, таким методом может быть цифровая фотография.

### *Образцы и методика исследований*

Основной объем опытов выполнен на двух продуктах Абагурской обогатительной фабрики: концентрате первой стадии мокрой магнитной сепарации и сливе гидроциклона второй стадии. На трех классах частиц, близких по крупности и количеству к их распределению в продуктах по технологической схеме: -1+0,28 мм, -0,28+0,07 мм и менее 0,07 мм проведен химический анализ, измерены основные магнитные характеристики; данные представлены в табл. 1.

Флокуляция и дефлокуляция отобранных продуктов изучались методом цифровой фотографии.

Таблица 1  
**Результаты химического анализа  
и магнитных измерений проб**

Проба	Классы, мм	Содержание, %		$\sigma_s$ , Ам <sup>2</sup> /кг	$\sigma_r$ , Ам <sup>2</sup> /кг	$H_C$ , кА/м
		Fe <sub>общ</sub>	Fe <sub>маг</sub>			
Концентрат	-1+0,28	43,10	39,38	48,0	2,7	3,61
	-0,28+0,07	52,36	49,92	58,6	4,2	4,26
	-0,07	57,72	55,35	63,1	6,5	5,28
Слив гидроциклона	-1+0,28	33,72	29,42	34,6	2,6	4,98
	-0,28+0,07	48,62	45,70	55,8	4,2	4,69
	-0,07	55,85	53,62	64,3	7,0	5,31

Съемка велась камерой Canon PowerShot S2 IS в рабочем режиме «Макро». Изображение фиксировалось камерой на «карту памяти», затем через адаптер переносилось в компьютер и там обрабатывалось в программе Adobe PhotoShop CS2.

Цифровая фотография нашла применение в работах по пенной флотации [2], ссылок на использование данного метода для задач магнитной сепарации в литературе не обнаружено.

Наблюдалась как «наведенная» внешним полем флокуляция, так и «остаточная», вызванная остаточной индукцией. Большая часть эксперимента проведена на материале крупностью -0,07+0 мм.

Пробы намагничивались двумя типами постоянных магнитов: пластинами из феррита бария (64x84x14 мм) со средней величиной поля  $H \sim 48$  кА/м и из неодимжелезобора (41x41x10 мм) с полем  $H \sim 200$  кА/м. Помещаемый перед магнитами деревянный экран  $d = 1$  см уменьшал напряженность поля до 24 и 80 кА/м. Т.е. интервал полей, в которых последовательно наблюдалась наведенная, а затем остаточная флокуляция, составлял от 24 до 200 кА/м.; величина поля измерялась тесламетром.

Сначала снимался исходный материал (массой  $\sim 0,5$  г), помещенный в чашку Петри в соотношении Т:Ж  $\sim 1:3$ . Далее поочередно фиксировалась

флокуляция в полях напряженностью  $H \sim 24$  кА/м (через экран) и 48 кА/м на пластине феррита бария под чашкой Петри. Первоначально наблюдалась наведенная, а затем – остаточная; в завершении – опыты в полях  $H \sim 80$  (через экран) и  $H \sim 200$  кА/м.

#### *Флокуляция абагурских проб*

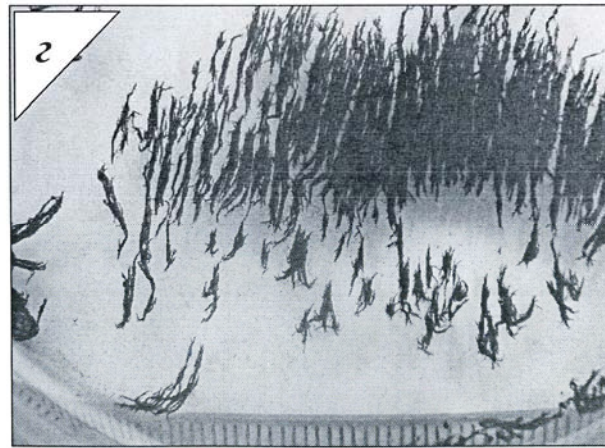
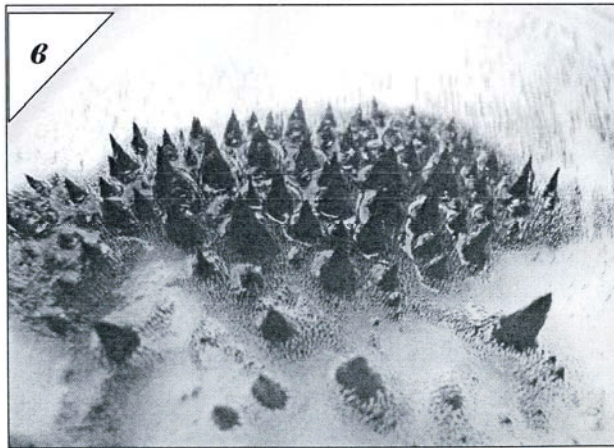
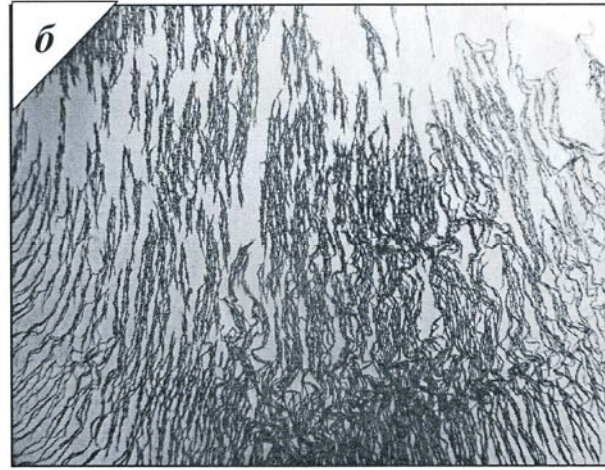
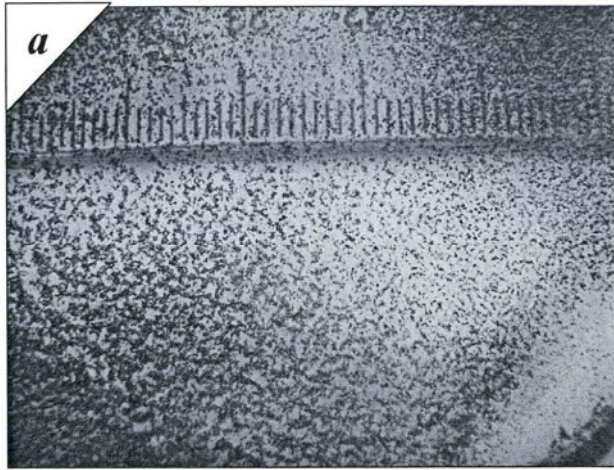
Теоретические вопросы флокулообразования описаны в монографии В.В. и В.И. Кармазиных [3], большой экспериментальный материал по предварительной магнитной обработке руд содержится в более ранней монографии Л.А. Ломовцева и др. [4].

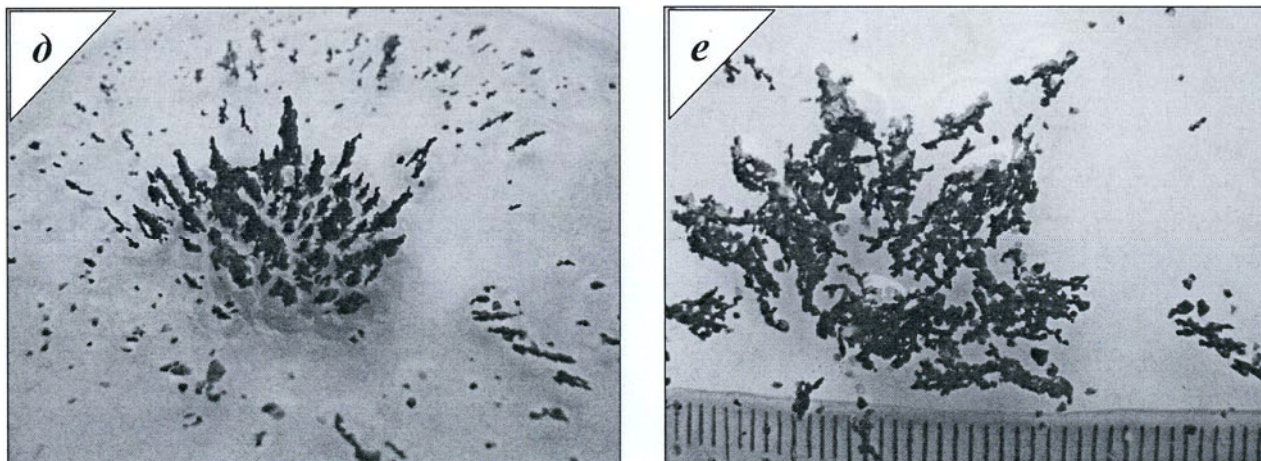
При «наведенной» флокуляции величина образующихся магнитных агрегатов, в основном, зависит от напряженности магнитного поля, размера частиц, их концентрации в пульпе и времени намагничивания. Остаточная флокуляция определяется коэрцитивной силой и остаточной намагниченностью материала.

По литературным данным, «активнее» флокулируют магнитомягкие руды. Для руд с  $H_C$  до 4 кА/м степень флокуляции достигает 90% в полях  $\sim 24$  кА/м; если  $H_C$  до 8 кА/м, то необходимое поле  $\sim 40$  кА/м.

Предложена приближенная формула расчета поля предельного намагничивания руд [1]:

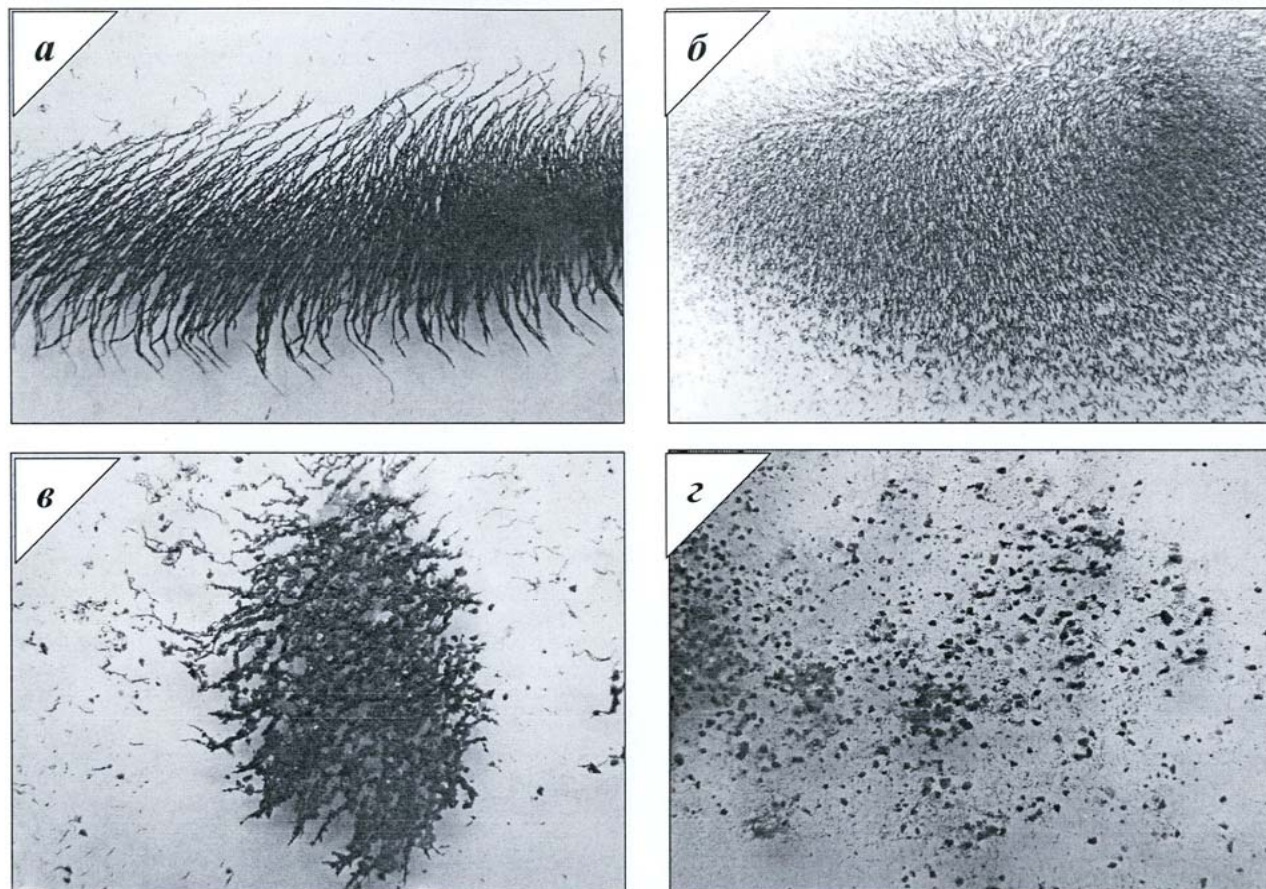
$$H_{\Pi} = 23 \sqrt[3]{H_C} \quad (1)$$





**Рис. 1. Флокуляция продуктов обогащения класса  $-0,07$  мм:** а – исходная проба концентрата; б – остаточная флокуляция концентрата,  $H = 24$  кА/м; в – наведенная флокуляция слива гидроциклона,  $H = 48$  кА/м; г – остаточная флокуляция слива гидроциклона,  $H = 48$  кА/м; флокуляция концентрата крупностью  $-1+0,28$  мм: д – наведенная флокуляция,  $H = 48$  кА/м; е – остаточная флокуляция,  $H = 48$  кА/м.





**Рис. 2. Дефлокуляция продуктов класса -0,07 мм:** а – исходная проба концентрата, остаточная флокуляция,  $H = 48$  кА/м; б – размагничивание в переменном поле  $H = 24$  кА/м; дефлокуляция частиц, крупностью  $-1+0,28$  мм: в – исходные флокулы слива гидроциклона, остаточная флокуляция,  $H = 48$  кА/м; г – размагничивание в переменном поле  $H = 40$  кА/м.

Основные результаты изучения (наблюдения) флокуляции абагурских проб представлены на фотографиях «сводного» рис. 1.

Различны формы агрегатов наведенной и остаточной флокуляции. В поле создаются объемные, в виде конусов плотные образования, направленные по полю. Флокулы за счет остаточной намагниченности – вытянутые пряди (распавшиеся наведенные флокулы), длиной 1-1,5 см, сечением до 1 мм; в полях 80 кА/м и выше  $d \sim 2-3$  мм. На материале слива гидроциклона массивные наведенные флокулы образуются в более высоких полях.

Близость магнитных параметров продуктов, заметная по таблице, объясняет отсутствие существенных различий в характере их флокуляции.

Оценка поля предельного намагничивания  $H_{\Gamma}$  по формуле (1) при усредненной  $H_C = 5,6$  кА/м дает величину  $H_{\Gamma} = 41,1$  кА/м; в опытах же мы видим флокуляцию при напряженности  $H = 24$  кА/м.

Анализ снимков флокул из частиц разной крупности (рис. 1) выявил следующее:

с ростом крупности частиц как наведенная, так и остаточная флокуляция проявляются слабее, процессы «сдвигаются» в более высокие поля;

массивные наведенные флокулы образуются только в высоких полях, а остаточные флокулы уменьшаются до 0,5 – 1 см., в крупности  $-1+0,28$  мм. видны отдельные, несфлюкулированные (немагнитные) частицы.

Обратная зависимость длины флокул от размера частиц, «сдвиг» длины флокул в более сильное поле с ростом их крупности замечена еще Л.А. Ломовцевым [4].

«Ослабление» флокуляции в зависимости от размера частиц связано со снижением содержания железа в них и соответственно – уменьшением ве-

личин магнитных характеристик, что видно из таблицы.

#### *Дефлокуляция продуктов обогащения*

Размагничивание продуктов в технологии обогащения – более сложная техническая задача, чем намагничивание. Величина переменного магнитного поля, когда необходимо начинать размагничивание  $H_p$  должна быть не менее поля  $H_1$ , при котором индукция в образце равна остаточной индукции, т.е.  $H_p \sim H_1$ ; зависимость для определения размагничивающих полей имеет вид [4]:

$$H_p = 28 \sqrt[3]{H_C} \quad (2)$$

По литературе основными факторами при размагничивании являются: максимальная напряженность переменного размагничивающего поля, частота поля, а также время размагничивания.

Магнитомягкие руды полностью размагничиваются в переменных полях  $\sim 40$  кА/м, рудам с высокой магнитной жесткостью требуется порядка 80 кА/м.

В настоящей работе фиксировался процесс размагничивания остаточной флокуляции. Съемка процесса размагничивания непосредственно в переменном поле невозможна из-за возникающей вибрации катушки, съемка велась через 2-3 секунды после действия поля. Пробы намагничивались постоянным полем  $H = 48$  кА/м., размагничивались в переменных полях от 6 до 40 кА/м.

На рис. 2 собраны снимки дефлокуляции проб концентрата и слива гидроциклона. Распад флокул, отделение частиц от флокул начинается в поле, равном коэрцитивной силе  $H_C$ , в более высоких полях процесс ускоряется, усиливаясь со временем пребывания частиц в переменном поле.

Отличий в дефлокуляции разных продуктов не обнаружено. Переменного поля  $\sim 40$  кА/м достаточно для

размагничивания всех сильномагнитных продуктов, что, как сказано выше, обусловлено близостью их магнитных величин.

Прослежена зависимость дефлокуляции от крупности частиц, результаты также приведены на рис. 2. Съемка показала, что в слабом переменном поле, равном  $H_C$ , крупные частицы не движутся, процесс разрушения флокул наступает в более сильных переменных полях с напряженностью  $\sim 24-40$  кА/м. Слабомагнитные и нерудные частицы остаются неподвижными.

Наблюдается аналогия процессу флокуляции при увеличении размера частиц, что также объясняется падением содержания железа и магнитных параметров в крупных частицах.

Выражение (2) максимального переменного поля размагничивания класса  $-0,07$  мм дает  $H_p = 50,4$  кА/м при усредненной коэрцитивной силе продуктов  $H_C \sim 5,6$  кА/м, что хорошо совпадает (коррелирует) с полученным в эксперименте значением  $H_p \sim 40$  кА/м.

## Выводы

1. Изучение процессов флокулообразования и разрушения продуктов магнитного обогащения эффективно методом цифровой фотографии. Цифровая технология значительно сокращает время и трудоемкость оценки их параметров.

2. Существенных отличий во флокуляции и дефлокуляции разных продуктов не обнаружено. Различны формы наведенных и остаточных флокул.

3. С увеличением крупности частиц материала флокуляция и дефлокуляция проявляются слабее, что обусловлено снижением содержания в них железа и магнитных величин.

4. Поле  $\sim 40$  кА/м можно считать оптимальным как для намагничивания, так и для размагничивания проб. В переменном поле данной напряженности материал представляет отдельные разрозненные частицы. Подобные поля технически достижимы на Абагурской обогатительной фабрике.

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волгай В.Ф., Кармазин В.И., Юров П.П. К вопросу об исследовании намагничивания и размагничивания магнетитовых и восстановленных железных руд. Обогащение полезных ископаемых. Научно-технический сборник. «Техника», Киев, вып. 3, 1968 г., С.19-25.

2. Мелик-Гайказян В.И., Емельянова Н.П., Драганов А.В. и др. К использованию цифровой фотографии в работах по пенной флотации. – В кн.: Сб. материалов V

Конгресса обогатителей стран СНГ; т. III, М.: Альтекс, 23 – 25 марта 2005 г., МИСиС, 2005, С. 299-301.

3. Кармазин В.В., Кармазин В.И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых, том 1. – М.: Издательство МГУ. 2005. – 670 с.

4. Ломовцев Л.А., Нестерова Н.А., Дробченко Л.А. Магнитное обогащение сильномагнитных руд. - М.: Недра, 1979. – 235 с.. **ГИАБ**

---

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Якубайлик Эдуард Константинович – кандидат физико-математических наук, ст. научный сотрудник Института физики СО РАН; churilov@iph.krasn.ru

Килин Владимир Иванович – кандидат технических наук, гл. обогатитель ОАО «Евразруда»; kilin\_vi@nkmk.ru.

Килин Сергей Владимирович – ведущий инженер технического отдела ЗАО «Полус»; т.с.89835022686.