

Abstract. Safety of works in the heavy loaded longwalls is a pressing scientific and practical problem. Currently, safety of works in the longwalls under the increasing loads is ensured by up-to-date powered supports and automatic control of their operation. Method for the powered support control has been improved, and now system of automatic control estimates probability of the gas-dynamic phenomena occurred in the faces and, in order to prevent them, controls and changes pressure in hydraulic cylinders of the powered support elements and, consequently, ensures quick response of the powered support sections to the changed mining-and-geological situation in the face. Thanks to this, safety of works and productivity of the mining operations are essentially increased. This article presents merit, schemes of work and efficiency of the proposed method.

Keywords: powered support control, pressure in hydraulic cylinders, sections of powered support.

Статья поступила в редакцию 24.09.2014

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.И. Дырдой

УДК 622.7:622.341.1

Надутый В.П., д-р техн. наук, профессор,
Чельшкіна В.В., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Сухарев В.В., канд. техн. наук
(ИГТМ НАН України)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА КЛАССИФИКАЦИИ МАГНИТОВОСПРИИМЧИВОЙ ГОРНОЙ МАССЫ

Надутый В.П., д-р техн. наук, професор,
Чолишкіна В.В., канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Сухарев В.В., канд. техн. наук
(ИГТМ НАН України)

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ КЛАСИФІКАЦІЇ МАГНІТОСПРИЙНЯТЛИВОЇ ГІРСЬКОЇ МАСИ

Nadutyu V.P., D. Sc. (Tech.), Professor,
Chelyshkina V.V., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Sukharev V.V., Ph.D. (Tech.),
(IGTM NAS of Ukraine)

STUDY ON IMPROVING QUALITY OF MAGNETIC ROCK CLASSIFICATION

Аннотация. Изложены материалы определения основных характеристик работы магнитного спирального классификатора в части гидроклассификационных процессов, конструктивных параметров и режимных показателей. Магнитный спиральный классификатор, оснащенный постоянным магнитным полем, предназначен для повышения селективности разделения пульпы по вещественному составу и был разработан для использования в технологии рудоподготовки базальтового сырья (туф, базальт, лавобрекчия). Значение работы состоит в определении ограничений процесса классификации, расчете основных характеристик магнитного спирального классификатора, плотности флоккул и скорости их осаждения в зависимости от напряженности магнитного поля.

Ключевые слова: гидроклассификация, магнитное поле, флоккулы, скорость осаждения.

Для Украины актуальны разработка и освоение собственных месторождений меди, что компенсирует широкомасштабные закупки меди за рубежом и естественное истощение накопленных еще с советских времен запасов медного лома. На сегодня относительно разведаны два перспективных рудопроявления – медистые песчаники Бахмутской котловины в Донбассе и более богатое по промышленным запасам Волынское полесье, а именно, Турско-Луговское поле самородной меди на Волыни (Рафаловское месторождение, Жиричи, Жменьки-Залесы и др.).

Общие запасы меди в Волынском рудном районе оценивают в 25÷30 млн. т., отдельных месторождений – от 0,5 млн. т до 5 млн. т. Медная минерализация на Волыни наблюдается в базальтах (до 2,6 % Cu), а также в сопровождающих основное месторождение туфах (до 0,7 %) и лавобрекчиях (до 5,0 %), [1]. Указанные породы не только богаты медью, в том числе самородной, но и обладают ярко выраженными магнитными свойствами благодаря наличию титаномагнетита (содержание чистого титана составляет до 4 %).

В ИГТМ НАН Украины проводятся исследования по разработке комплексной технологии переработки пород базальтовых карьеров с целью извлечения ценных минералов, в том числе самородной меди [2]. В настоящее время на карьерах Волыни при открытой добыче осуществляется лишь переработка базальтов на камень, гальку и щебень. Крупность товарной продукции составляет +5...+80 мм, классы мельче 5 мм поступают в отходы. В первую очередь актуально (и малозатратно) создание опытного участка небольшой производительности 6÷8 т/ч по переработке лежалых отходов.

Для создания технологии рудоподготовки исследовались способы отсадки, электрической и магнитной сепарации. Первичные результаты показали, что эти операции недостаточно селективны по извлечению меди. Например, при магнитной сепарации базальта (крупность питания – 2,5 мм) сырье делится примерно пополам, однако и концентрат, и хвосты имеют высокое содержание меди (больше 0,5 %). Причины этому – наличие шламов, относительно высокая крупность и широкий диапазон грансостава питания.

Чтобы повысить селективность разделения, было предложено в схеме рудоподготовки акцентировать внимание на методах первичного гравитационного обогащения. С этой целью был разработан «Магнитный спиральный классификатор» – механический спиральный классификатор с постоянным магнитным полем в зоне разделения [3]. В статье приведены теоретические и экспериментальные основы проектирования этой разработки. Расчеты показателей и статистическая обработка экспериментов выполнялась с использованием стандартной программы Microsoft Office Excel.

Магнитный спиральный классификатор выделяет два продукта: пески, которые являются тяжелой фракцией, разгружаемой спиралью, и слив – легкая фракция, выделяемая переливом через сливной порог. Зеркало пульпы в классификаторе определяется характерными размерами D и L, связанными с диа-

метром спирали и углом наклона ванны [4]. Согласно изобретению [3], передняя стенка ванны, вплоть до сливного порога, выполнена магнитной. Этим в зоне осаждения частиц создается магнитное поле, флоккулирующее пульпу. За счет флоккуляции обеспечена возможность увеличивать скорость восходящего потока в ванне классификатора, вывести в слив довольно крупные нерудные частицы и, одновременно, осадить в пески тонкие рудные магнитные частицы. То есть, магнитный классификатор отличается от обычного повышенной селективностью разделения по вещественному составу – позволяет вывести в пески самородную медь, медные минералы, а также частицы магнетита и титаномагнетита не только крупные, но и мельчайшие.

Чтобы обеспечить выделение в слив классификатора частиц заданного размера, скорость восходящего потока должна быть больше скорости их осаждения. Последняя зависит от плотности частицы. Плотность базальтов – $2520 \div 2970 \text{ кг/м}^3$, на 45-55 % базальт состоит из SiO_2 . При измерениях плотность нерудных частиц базальта составила 2650 кг/м^3 . Для этой плотности были получены зависимости (рис.1). Расчетные формулы приведены в [4].

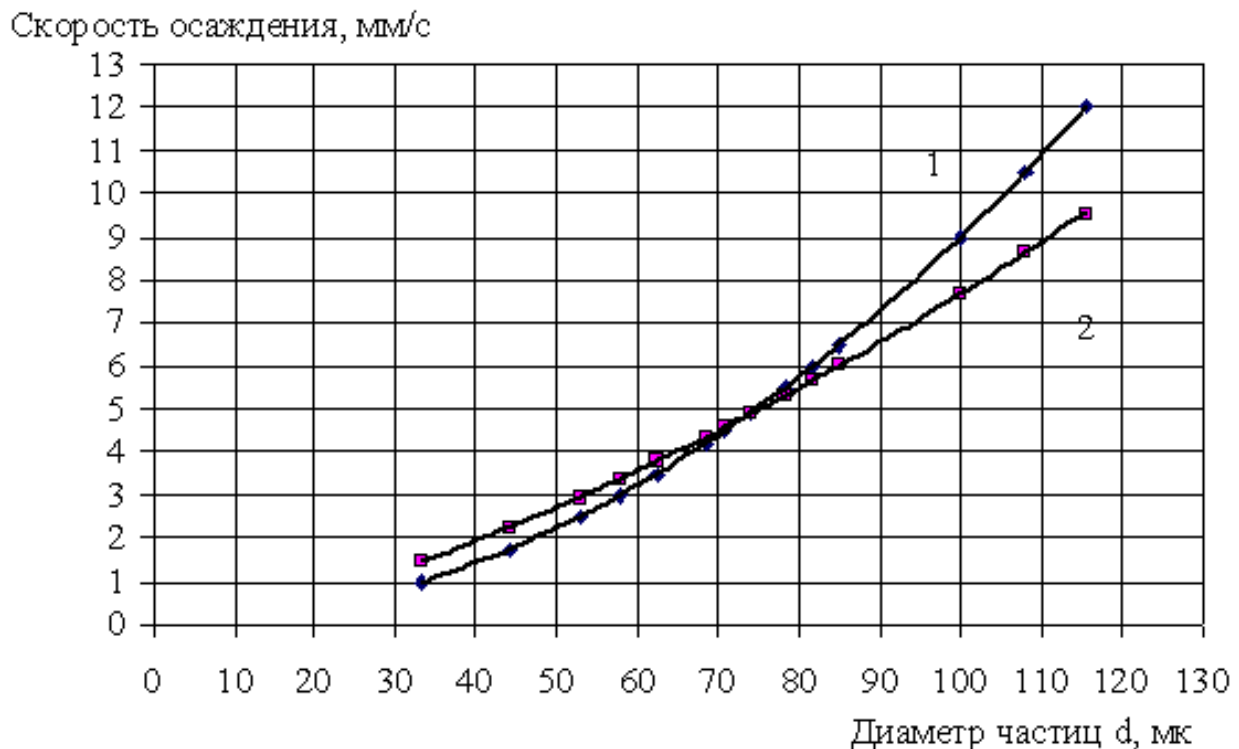


Рисунок 1 – Зависимость скорости осаждения нерудных частиц базальта от диаметра:
1 – по Стоксу ($\sim d^{1/2}$); 2 – по Аллену ($\sim d^{3/2}$)

Зададим условие, чтобы все нерудные частицы размером меньше 60 мк должны быть вынесены в слив, тогда, из рис. 1, скорость восходящего потока должна быть не менее 3,5 мм/с – нижнее граничное значение. Оценка скорости на рис. 1 дана для ламинарных потоков (Стокс) и в начале переходной области (Аллен) и действительна для значений числа Рейнольдса до 30.

Магнитное поле оказывает влияние на осаждение магнитовосприимчивых

частиц. Для пород базальтовых карьеров это в основном магнетит (плотность 5000 кг/м^3), ильменит (плотность 4800 кг/м^3) и их сростки.

Скорость осаждения флоккул исследовалась экспериментально по времени опускания визуальной границы осветления суспензии в пробирке размерами $0,4 \times 0,065$ (м). Суспензия была приготовлена из магнитной фракции породы, предварительно измельченной до крупности 95 % кл. –44 мк (средний размер частиц 30 мк), содержание твердого в суспензии составляло 30 %. Измерения проводились при параллельном движении потока расположении магнитных плиток снаружи пробирки. Так, на расстоянии 0,3 м от нее напряженность поля составляла 1 кА/м (измерялась датчиком Холла при пересчете единиц $1 \text{ гс} = 10^{-4} \text{ Т} = 4\pi \text{ кА/м}$, магнитная проницаемость суспензии ~ 1 и напряженность поля H практически равна магнитной индукции B). По высоте столба суспензии поле менялась незначительно (примерно на 10 %). Крупность частиц, плотность и скорость приведены в единицах, привычных для практики обогащения. Отметим, что при контакте суспензии с магнитной поверхностью, последняя зарастает магнетитовой “ворсой” (на 2÷4 см в динамике), однако поскольку она является магнитопроводом, то не приводит к изменению напряженности поля в свободной от зарастания зоне. Результаты измерений скорости осаждения флоккул приведены на (рис. 2).

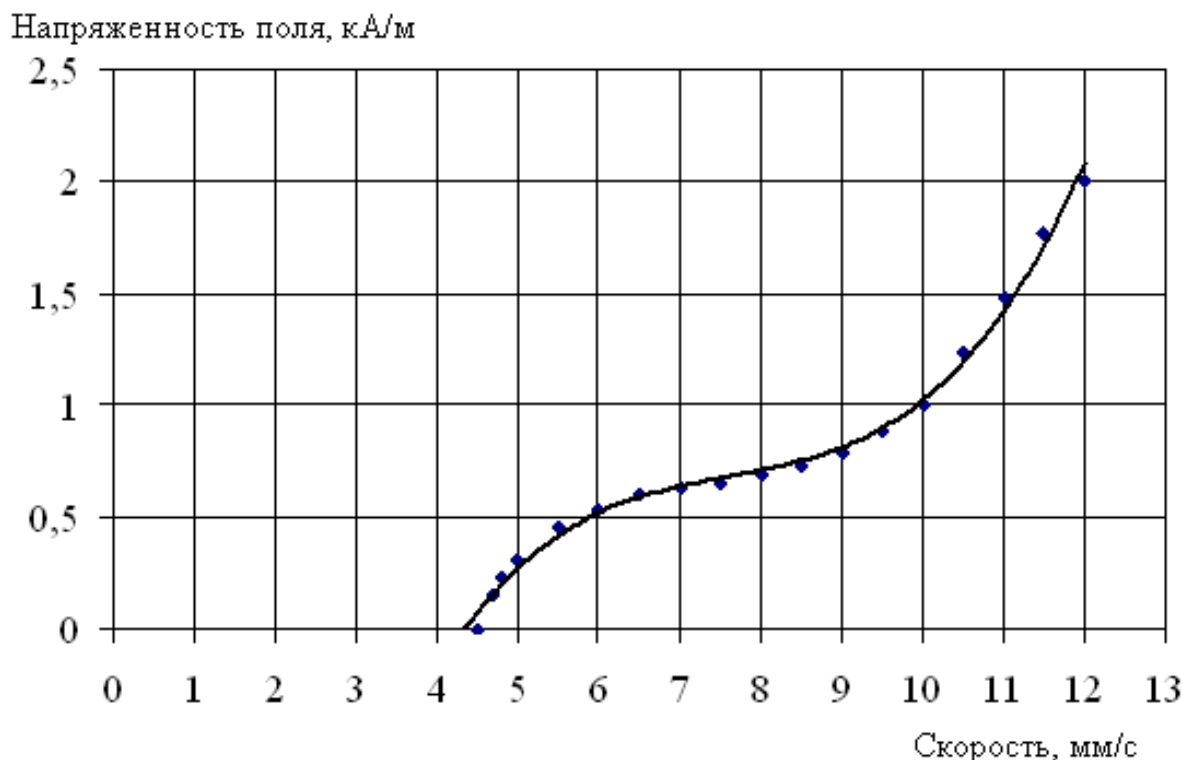


Рисунок 2 – Влияние магнитного поля на скорость осаждения магнитной фракции базальта

Скорость осаждения до измерений в магнитном поле составила 4,5 мм/с. Интенсивное возрастание скорости, примерно, на 30 % начинается с напряженности магнитного поля 0,5 кА/м (рис. 2). Взаимосвязь H и v с высокой точно-

стью (в оценке по квадрату коэффициента корреляции R^2) описывается выражением

$$H = 0,013 v^3 - 0,3 v^2 + 2,35 v - 5,527, \quad R^2 = 0,994 \quad (1)$$

Величина скорости связана с характерным размером флоккулы d (диаметр для сферической формы, толщина – для вытянутой цилиндрической) известным выражением [4]

$$v = \frac{Kd^2\Delta}{\nu} \quad (2)$$

где K – коэффициент, который для цилиндрической и сферической формы флоккул принят одинаковым и равным 0,5448 [2]; $\Delta = (\rho_{\phi} - \rho_e) / \rho_e$ – относительная разность плотностей флоккулы и воды (плотность магнетитовой флоккулы в среднем составляет 2000 кг/м³ [2]); ν – кинематический коэффициент вязкости.

Из выражений (1), (2), например, следует, что при $H = 0,63$ кА/м скорость осаждения флоккул составляет $v = 7$ мм/с, диаметр флоккул ~ 110 мк, визуальная характерная длина флоккул $2 \div 4$ мм.

Для скорости осаждения флоккул в диапазоне $10 \div 12$ мм/с, при напряженности поля $1,5 \div 2$ кА/м, степень укрупнения осаждающихся частиц за счет флокуляции в слабых магнитных полях составит

$$d_{\phi} : d_m = [v_{\phi}(\rho_m - \rho_e)]^{1/2} : [v_m(\rho_{\phi} - \rho_e)]^{1/2} = 3 \div 3,2 \quad (3)$$

где для единичной магнитной частицы $\rho_m = 5000$ кг/м³, $v_m = 4,5$ мм/с, для флоккулы $\rho_{\phi} = 2000$ кг/м³.

Согласно классическому подходу отношение диаметров частиц, имеющих одинаковую скорость падения, пропорционально квадратному корню из их плотностей [4]. Тогда, при плотности магнитной, нерудной частиц и флокулы: $\rho_m = 5000$ кг/м², $\rho_n = 2650$ кг/м², $\rho_{\phi} = 2000$ кг/м², соответственно, получим:

$$d_{\phi} : d_n : d_m = \sqrt{(\rho_m - \rho_B)} : \sqrt{(\rho_n - \rho_B)} : \sqrt{(\rho_{\phi} - \rho_B)} \approx 2 : 1,6 : 1. \quad (4)$$

Разработана компьютерная программа расчета показателей магнитного классификатора. В ней, по аналогии с известными программами Metso Minerals [5] и Caspeo [6], в исходные данные включены конструктивные и режимные параметры аппарата. Новым является, то, что программа позволяет не только устанавливать технологические показатели (производительность и скорость восходящего потока), но и, на основании вышеприведенных исследований, определять граничную крупность классификации частиц различного вещественного состава. Программа пригодна для выполнения конструкторских и инженерных расчетов (вариации технологических, конструктивных и режимных па-

раметров классификатора), общедоступна и проста в использовании, так как выполнена в стандартном редакторе Excel Microsoft Office.

Пример расчета иллюстрирует табл. 1, в которой обозначено: Q – производительность; % тв. – плотность пульпы; ρ – плотность пульпы; L , D , S – длина, ширина и площадь зеркала пульпы, соответственно, v – скорость восходящего потока.

Таблица 1 – Расчет характеристик магнитного спирального классификатора

Q , т/ч	% тв.	ρ , г/л	$V_{сл.}$, м ³ /ч	D , м	L , м	S , м ²	v , мм/с
6	25	1250	18	1	0,7	0,7	7,1

В соответствующие ячейки табл. 1 в файле программы Excel вводятся следующие расчетные формулы:

$$\begin{aligned}
 v &= V_{сл.} / 3,6 * D * L; \\
 V_{сл.} &= Q * (1000 - \rho / 5) / (\rho - 1000) \\
 \% \text{ тв.} &= 100 / (1 - 1/5) * (1 - 1000 / \rho);
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Варьируемыми параметрами являются: производительность по твердому Q (т/ч), габариты зеркала D , L (м) и плотность пульпы в ванне ρ (г/л). По поводу последнего показателя отметим, что на практике он предпочтительнее, чем плотность, определяемая как процент твердого, поскольку ρ в (г/л) легко измеряется и контролируется (взвешиванием мерной кружки с пульпой).

Определим верхнюю границу плотности пульпы в ванне классификатора, например, для Q , L , D из таблицы 1 (рис. 3).

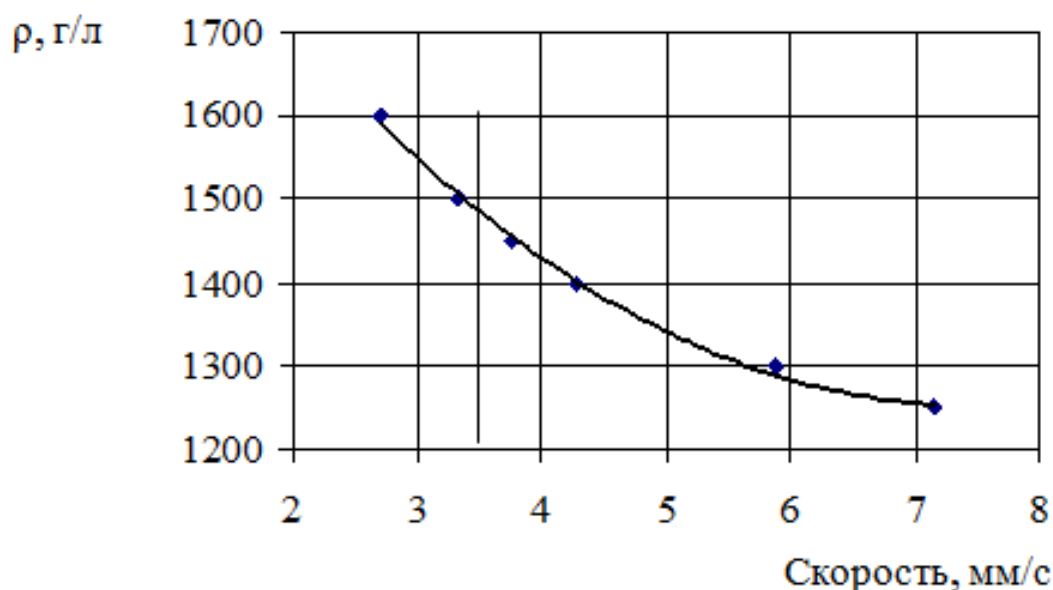


Рисунок 3 – Взаимосвязь плотности пульпы и скорости восходящего потока

Ограничением плотности суспензии сверху является скорость падения не-

рудной частицы заданной крупности. Из рис. 3 видно, что при $v = 3,5$ мм/с (условие выноса нерудных частиц 60 мк и мельче) плотность пульпы не должна превышать 1500 г/л.

Расчет крупности классификации выполняется по скорости восходящего потока. Для этого, используя формулу (2), в символах Excel вводим формулы:

$$d = \text{КОРЕНЬ} ((v / \Delta / 54500)) * 10000$$

$$\Delta = (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{в}}) / \rho_{\text{в}}, \quad (6)$$

где индекс "ч" относится к соответствующей частице.

Расчет иллюстрирует таблица 2.

Таблица 2 – Граничная крупность разделения частиц в магнитном спиральном классификаторе при $v = 7,1$ мм/с (по табл.1)

Показатели / частицы	Нерудные (базальт)	Магнитные	Флоккулы	Самородная медь
Плотность, $\delta \cdot 10^3$, кг/м ³	2,65	5	2	8,9
Δ , ед.	1,65	4	1	7,9
d, мк	89	57	114	41

Все частицы с диаметром меньше граничной крупности, указанной в табл. 2, будут вынесены в слив, крупнее – осядут в пески. Это не касается магнитных частиц, так как частицы крупностью меньше 57 мк будут структурированы во флоккулы и в слив не попадут.

Следовательно, при скорости 7,1 мм/с в пески поступит нерудная фракция крупнее 89 мк, магнитные частицы крупнее 57 мк и мельчайшая магнитная фракция в виде флоккул, которая ранее уходила в слив. При этом крупность флоккул составит 114 мк, для их создания, согласно формуле (1), нужно поле с напряженностью $H = 0,63$ кА/м. Одновременно с этим в пески поступят частицы самородной меди крупностью выше 41 мк, которая приемлема для современных электросепараторов.

Таким образом, использование магнитного спирального классификатора в голове схемы рудоподготовки пород базальтовых карьеров позволит получить легкую фракцию (например, для производства минеральной ваты) и насыщенные тяжелыми металлами пески, пригодные для последующей магнитной и электрической сепарации.

Изложенные в статье методы расчета характеристик аппарата могут использоваться при проектировании не только спиральных, но и других конструкций гидравлических классификаторов с магнитным полем, которые предназначены для разделения измельченных материалов, содержащих магнитную компоненту.

Выводы. Научное значение результатов исследований заключается в определении плотности флоккул и скорости их осаждения в зависимости от напряженности магнитного поля, что позволяет оценивать диаметр флоккул и сте-

пень укрупнения частиц суспензии за счет флокуляции.

Практическое значение состоит в определении ограничений процесса классификации (по скорости восходящего потока и плотности суспензии), а также в разработке простой компьютерной программы расчета основных характеристик магнитного классификатора (гидравлических, конструктивных, технологических), которая позволяет варьировать параметры магнитного спирального классификатора для различных технологических процессов и материалов, а также может использоваться при проектировании других конструкций магнитных гидроклассификаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат, А.Ф. Перспективы комплексной переработки базальтового сырья Волыни / А.Ф.Булат, В.П.Надуть, З.Р. Маланчук // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. - Днепропетровск, 2010. – Вып. 85. – С. 3-7.
2. Физико-химическая механика геотехнологических систем: идентификация параметров и управление. Раздел: Развитие научно-технических основ повышения эксплуатационных показателей ресурсосберегающих технологий и оборудования для комплексной переработки минерального сырья: отчет о НИР (промежуточный): 42-44 /ИГТМ НАН Украины; рук. НИР Блюсс Б.А, рук. раздела НИР Надуть В.П.; исп.: Челышкина В.В. [и др.].- Днепропетровск, 2013. - 78 с. - № ГР 0112U000493. - Том 5. - Инв. № 7509.
3. Пат. 92056 України, МПК8 В03В 5/52, 5/62, В03С 1/08. Магнітний спіральний класифікатор / Надуть В.П., Чолишкіна В.В., Сухарев В.В.; заявник і патентовласник ІГТМ НАН України. - № U201402304; заявл. 06.03.2014; опубл. 25.07.14, Бюл. № 14.
4. Справочник по обогащению руд / Под ред. О.С. Богданова, В. И. Ревнивцева [и др.]. – Т.1. – М. : Недра, 1983. – 447 с.
5. Bruno: Metso's simulating tool [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.metso.com/miningandconstruction/mm_segments.nsf/WebWID/WTB-081113-2256F-FD63A/\\$File/Bruno_presentation.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/mm_segments.nsf/WebWID/WTB-081113-2256F-FD63A/$File/Bruno_presentation.pdf). – Загл. с экрана.
6. USIM PAC. Powerful process simulator [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.caspeo.net/USIMPAC>. – Загл. с экрана.

REFERENCES

1. Bulat, A.F, Naduty, V.P. and Malanchuk, Z.R. (2010), "Prospects for complex processing of raw basalts of Volyn", *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 85, pp. 3-7.
2. IGTM NAS of Ukraine (2013), *Fiziko-himicheskaya mekhanika geotekhnologicheskikh system: identifikatsiya parametrov i upravleniye. Razdel: Razvitiye nauchno-tekhnicheskikh osnov povysheniya ekspluatatsionnykh pokazatelej resursosberegaushchikh tekhnologiy i oborudovaniya dlia kompleksnoy pererabotki mineralnogo syrya* [Physical and chemical mechanics geotechnical systems: identification and management options. Title: Development of scientific and technical bases to enhance the operational performance of resource-saving technologies and equipment for complex processing of mineral raw materials] : report on research projects (intermediate), IGTM NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine.
3. Naduty, V.P., Chelyshkina, V.V. and Sukharev, V.V., M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine (2014), *Magnitnyy spiralnyy klassifikator* [Magnetic spiral classifier], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 92056.
4. Bogdanov, O.S., Revnivitsev, V.I. and other (1983), *Spravochnik po obogashcheniyu rud* [Reference for ore dressing], in Bogdanov, O. S., Revnivitsev, V. I. and other (ed), Nedra, Moscow, Russia.
5. Metso Mineral's presentation (2008), "Bruno: Metso's simulating tool", available at: [http://www.metso.com/miningandconstruction/mm_segments.nsf/WebWID/WTB-081113-2256F-FD63A/\\$File/Bruno_presentation.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/mm_segments.nsf/WebWID/WTB-081113-2256F-FD63A/$File/Bruno_presentation.pdf), (Accessed 10.09.2014).
6. The company's Caspeo products (2011), "USIM PAC. Powerful process simulator", available at: <http://www.caspeo.net/USIMPAC>, (Accessed 10.09.2014).

Об авторах

Надутьий Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, nadutyvp@yandex.ua.

Чельшикина Валентина Васильевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, iron_ore@mail.ru.

Сухарев Виталий Витальевич, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, agnivik@ukr.net.

About the authors

Nadutyu Vladimir Petrovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.C. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, NadutyVP@yandex.ua.

Chelyshkina Valentina Vasilievna, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher of Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, iron_ore@mail.ru.

Sukharyev Vitaliy Vitalievich, Candidate of Technical Sciences (Rh.D), Researcher in Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.C. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, agnivik@ukr.net.

Анотація. Викладено матеріали визначення основних характеристик роботи магнітного спірального класифікатора в частині гідрокласифікаційних процесів, конструктивних параметрів і режимних показників. Магнітний спіральний класифікатор, оснащений постійним магнітним полем, призначений для підвищення селективності розділення пульпи за речовинним складом та був розроблений для використання в технології рудопідготовки базальтової сировини (туф, базальт, лавобрекція). Значення роботи полягає у визначенні обмежень процесу класифікації, розрахунку основних характеристик магнітного спірального класифікатора, щільності флокул і швидкості їх осадження в залежності від напруженості магнітного поля.

Ключові слова: гідрокласифікація, магнітне поле, флокули, швидкість осадження.

Abstract. The paper determines main operational characteristics of magnetic spiral classifier in terms of hydroclassification processes, design parameters and mode indications. A magnetic spiral classifier with constant magnetic field was designed for improving selectivity of the pulp separation by material composition and using basalt raw materials (tuff, basalt, lavabreccia) in technology of the ore pretreatment. Findings of this study make possible to specify limits for the classification process and calculate basic characteristics of the magnetic spiral classifier, floccules density and rate of their deposition depending on magnetic field strength.

Keywords: hydraulic classification, magnetic field, floccules, deposition rate.

Статья поступила в редакцию 15.09.2014

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Б.А. Блюссом