



УДК 622.272/.275

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАКЛАДОЧНОЙ ГИДРОСМЕСИ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ ОАО «КОМБИНАТ КМАРУДА»****THE STUDY OF RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF STOWING HYDROMIX OF «COMBINAT KMARUDA» FERRUGINOUS QUARTZITES TAILINGS****Е.А. Ермолович<sup>1</sup>, О.В. Ермолович<sup>2</sup>  
Е.А. Ermolovich<sup>1</sup>, O.V. Ermolovich<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Белгородский государственный национально-исследовательский университет, Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85<sup>2</sup> ООО Торговый дом «Карина», Россия, 308000, г. Белгород, пр-т Б. Хмельницкого, 73<sup>1</sup> Belgorod State University, 85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia<sup>2</sup> LLC Trading House 'Karina', 73, B. Hmelnitckogo Av, Belgorod, 308000, Russia

E-mail: elena.ermolovich@mail.ru; oleg.ermolovich@mail.ru

*Ключевые слова:* закладочная гидросмесь, отходы обогащения железистых кварцитов, реологические характеристики, флокулянты.

*Key words:* stowing hydromixes, waste of ore-dressing ferruginous quartzites, rheological characteristics, flocculants.

*Аннотация.* Рассмотрены результаты экспериментальных исследований, моделирующих поведение закладочной гидросмеси при движении и экстренной остановке. Приведены экспериментально полученные значения ее предельного напряжения сдвига и вязкости. Анализ данных показывает, что реологические характеристики увеличиваются со временем движения сгущенной пульпы и через 12.5 минут уже не отвечают критерию транспортабельности самотеком. Это соответствует расстою 1350 м со средней скоростью 1.8 м/с. Время транспортирования 10–11 минут является в данном эксперименте переломным. И оно грубо и приблизительно оценивает предельную дальность транспортирования как 1000–1100 м без учета промывки водой. Остановка пульпы на этой отметке не должна превышать 25–30 минут. Применение суперпластификатора Полипласт СП-1 в количестве 0.6% от массы сухого вещества позволяет снизить предельное напряжение сдвига гидросмеси отходов обогащения на 33% и тем самым увеличить дальность ее транспортирования.

*Resume.* The article considers the results of experimental studies that simulate the behavior of stowing hydromix in motion and an emergency stop. The experimentally obtained values of its ultimate shear stress and viscosity are presented. Analysis of the data shows that the rheological characteristics are increased with the time of motion of the condensed pulp and in 12.5 minutes do not meet the criteria of transportability of gravity. This corresponds to a distance of 1350 m with the average speed of 1.8 m/s. Transportation time of 10–11 minutes is a turning point in this experiment. And its rough and approximate estimation of the maximum distance of transportation as 1000–1100 m without flushing with water. Stopping the pulp at this level should not exceed 25–30 minutes. The use of superplasticizer Polyplastr CP-1 in the amount of 0.6% by weight of dry matter can reduce the yield stress of the slurry tailings by 33% and thus increase the distance of its transport.

## Введение

Гидравлическая закладка отличается высокой производительностью труда, хорошим заполнением всех пустот и сравнительно небольшой усадкой закладочного массива (8–12%). К недостаткам этого вида закладки можно отнести загрязнение и обводнение горных выработок. Сгущение закладочной гидросмеси существенно уменьшает вредные последствия гидрозакладки, однако сокращает дальность транспортирования пульпы.

Транспортабельность закладочных смесей оценивается величиной их реологических параметров. Смеси пригодны для транспортирования по трубам при подвижности 9–14 см (полное погружение эталонного конуса), предельном напряжении сдвига не более 200 Па в самотечном режиме и не более 150 Па при перекачивании насосами [Монтянова, 2005; Шендрик и др., 1980]. Реологические характеристики изменяются во времени. Для выбора наиболее рационального способа и схем подачи закладочной смеси в камеры необходимо учитывать эти изменения.

Исходя из этого, основными задачами работы являлись:



– экспериментальные исследования вязкости 70%-ной гидросмеси отходов обогащения: определение вязкости через интервалы времени после имитации транспортирования на вибростоле; определение вязкости через интервалы времени после имитации остановки движения;

– экспериментальные исследования предельного напряжения сдвига 70%-ной гидросмеси отходов обогащения: определение предельного напряжения сдвига через интервалы времени после имитации транспортирования на вибростоле; определение предельного напряжения сдвига через интервалы времени после имитации остановки движения.

### Объекты и методы исследования

Объект исследования – гидросмесь текущих отходов обогащения железистых кварцитов мокрой магнитной сепарации ОАО «Комбинат КМАруда», сгущенных флокулянтами.

Химический анализ, выполненный методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) на спектрометре ARL Optim'X, показал, что отходы обогащения железистых кварцитов мокрой магнитной сепарации содержат по весу около 59.82%  $SiO_2$ , 20.36%  $Fe_2O_3$ , 6.67%  $CaO$ , 2.20%  $MgO$ , 7.63%  $CO_2$ , 1.09%  $P_2O_5$ , 0.91%  $Al_2O_3$ , 0.438%  $K_2O$ , 0.34%  $Na_2O$ , 0.274%  $TiO_2$ , 0.147%  $MnO$ , 0.0705%  $SO_3$ , 0.0355%  $WO_3$ , 0.0302%  $SrO$ , 0.0089%  $CuO$ , 0.0026%  $ZrO_2$ , 0.0021%  $Y_2O_3$ . Рентгеновские дифракционные спектры, полученные на дифрактометре Ultima IV Rigaku ( $Cu\ K\alpha$ ,  $\lambda = 0.154059$  нм, в области углов  $2\theta$  от 10 до 110° с пошаговым сканированием  $\Delta(2\theta) = 0.02^\circ$  и временем экспозиции 2.5 с), представлены только дифракционными линиями кварца  $SiO_2$  (#00-046-1045 ICDD PDF-2), гематита  $Fe_2O_3$  (#01-086-0550 ICDD PDF-2), магнетита (#01-086-1346 ICDD PDF-2)  $Fe_3O_4$  и доломита  $CaMg(CO_3)_2$  (#01-073-2361 ICDD PDF-2).

В качестве флокулянта применялся Magnofloc 155.

Реологические характеристики снимались на вискозиметре «Реотест-2» по стандартной методике.

### Результаты и их обсуждение

Проведенные экспериментальные исследования и расчеты позволили спроектировать модель поведения 70%-ной гидросмеси отходов обогащения железистых кварцитов, сгущенных флокулянтами, во времени при движении и экстренной остановке. Концентрация пульпы была выбрана с учетом того, что не меньшая концентрация требуется для получения твердеющей закладочной смеси на основе сгущенных отходов обогащения и молотого доменного гранулированного шлака.

Полученные данные экспериментальных исследований реологических характеристик после имитации транспортирования пульпы приведены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

**Реологические параметры гидросмеси отходов обогащения, сгущенных флокулянтом Magnofloc 155, после имитации транспортирования пульпы**  
**The rheological parameters of slurry waste of ferruginous quartzites condensed by flocculant Magnofloc 155 after transportation of pulp imitation**

| Интервалы времени движения, мин | Предельное напряжение сдвига, Па | Вязкость, Па·с |
|---------------------------------|----------------------------------|----------------|
| 0                               | 63.7                             | 0.364          |
| 3.5                             | 117.1                            | 0.455          |
| 6.5                             | 85.8                             | 0.355          |
| 10                              | 153.3                            | 0.476          |
| 12.5                            | 221.39                           | 0.549          |

Интересны с научной и практической точки зрения результаты изменения реологических свойств гидросмеси отходов обогащения при имитации ее аварийной остановки при движении по трубопроводу, так как на примере данного вида закладочного материала исследован наиболее экстремальный вариант аварийной остановки закладочной пульпы. Предельное напряжение сдвига 70%-ной гидросмеси отходов обогащения в начале движения более чем в 3 раза превышает предельное напряжение сдвига твердеющих закладочных смесей. Гидросмесь в покое расслаивается, предельное напряжение сдвига сильно возрастает до критических значений, поэтому при ее аварийной остановке перезапуск системы будет более затруднен, чем при остановке твердеющих смесей, так как последние не расслаиваются, время начала схватывания их превышает 4 часа, и реологические характеристики в течение 25–30 минут движения даже у



твердеющей смеси с содержанием твердого 80% и 30%-ной долей цемента в общем количестве вяжущего увеличиваются лишь на 20%, тогда как у гидросмеси возрастают в 1.4 раза за 10 минут.

Результаты экспериментальных исследований реологических характеристик после имитации остановки пульпы приведены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

**Реологические параметры гидросмеси отходов обогащения, сгущенных флокулянтom Magnofloc 155, после имитации остановки движения**  
**The rheological parameters of slurry waste of ferruginous quartzites condensed by flocculant Magnofloc 155 after traffic stop imitation**

| Интервалы времени движения, мин | Интервалы времени остановки, минуты | Предельное напряжение сдвига, Па | Вязкость, Па·с |
|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------|
| 0                               | 0                                   | 63.7                             | 0.364          |
|                                 | 10                                  | 69.7                             | 0.385          |
|                                 | 20                                  | 79.9                             | 0.395          |
|                                 | 30                                  | 92.3                             | 0.414          |
|                                 | 40                                  | 98.3                             | 0.445          |
|                                 | 60                                  | 109.7                            | 0.495          |
| 3.5                             | 0                                   | 117.1                            | 0.455          |
|                                 | 10                                  | 123.3                            | 0.464          |
|                                 | 20                                  | 127.8                            | 0.475          |
|                                 | 30                                  | 154.7                            | 0.490          |
|                                 | 40                                  | 170.2                            | 0.503          |
|                                 | 60                                  | 184.4                            | 0.519          |
| 10                              | 0                                   | 153.3                            | 0.476          |
|                                 | 10                                  | 159.7                            | 0.490          |
|                                 | 20                                  | 175.8                            | 0.510          |
|                                 | 30                                  | 193.3                            | 0.520          |
|                                 | 40                                  | 212.6                            | 0.535          |

Анализ результатов показывает следующее. Предельное напряжение сдвига в начальный момент составило около 64 Па. Это не превышает критерий транспортабельности самоотечным способом. После 3.5 минут движения возросло до 117 Па. Дальнейшее движение в течение 6.5 минут от начала процесса характеризовались величиной 85.8 Па. Следует отметить, что подобное уменьшение вязкости пульпы через 5-10 минут транспортирования отмечали и другие исследователи на других продуктах. Реологические параметры за 10 минут еще удовлетворяют критерию транспортабельности (153 Па), а планку в 12.5 минут в данном эксперименте преодолеть не удалось.

Имитация аварийной остановки трубопровода в начале движения в течение 10 минут от начала движения привела к незначительному увеличению предельного напряжения сдвига до 69.7 Па. Двадцать минут простоя увеличили характеристику до 79.9 Па, а часовая остановка привела к увеличению параметра до 109.7 Па. То есть простой в течение часа после начала движения не нарушает критерий транспортабельности пульпы самотеком. Это касается начального этапа движения. Часовая остановка на отметке 3.5 мин увеличит предельное напряжение сдвига до 184.4 Па.

Дальнейший анализ приведенных данных показывает, что реологические характеристики возрастают со временем движения сгущенной пульпы и через 12.5 минут уже не отвечают критерию транспортабельности самотеком. Это приблизительно соответствует состоянию 1350 м при усредненной скорости 1.8 м/с. Время транспортирования 10–11 минут является в данном эксперименте переломным. И оно грубо и приблизительно оценивает предельную дальность транспортирования как 1000–1100 м без учета промывки водой. Остановка пульпы на этой отметке не должна превышать 25–30 минут. Применение суперпластификатора Полипласт СП-1 в количестве 0.6% от массы сухого вещества позволяет снизить предельное напряжение сдвига гидросмеси отходов обогащения на 33% [Ермолович, 2009] и тем самым увеличить дальность ее транспортирования.

Экспериментальные исследования хорошо согласуются с расчетными данными, полученными авторами ранее [Ермолович, 2013] и могут рекомендоваться для оценки дальности транспортирования закладочной гидросмеси отходов обогащения железистых кварцитов.



### Список литературы References

1. Ермолович Е.А. 2009. Разработка и исследование способов утилизации отходов обогащения железистых кварцитов Курской магнитной аномалии. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тула, 22 с.  
Ermolovich E.A. 2009. Razrabotka i issledovanie sposobov utilizatsii otkhodov obogashcheniya zhelezistykh kvartsitov Kurskoy magnitnoy anomalii [Development and research of waste products from dressing the ferruginous quartzites of the Kursk Magnetic Anomaly recycling methods]. Abstract. dis. ... cand. engin. sciences. Tula, 22. (in Russian)
2. Ермолович Е.А. 2013. Расчет дальности транспортирования самотеком 70%-ной гидросмеси отходов обогащения железистых кварцитов, сгущенной флокулянтom Magnofloc 155. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), (8): 19–22.  
Ermolovich E.A. 2013. The calculation of distance transporting by gravity 70% slurry waste of ferruginous quartzites condensed by flocculant Magnofloc 155. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)], (8): 19–22. (in Russian)
3. Монтянова А.Н. 2009. Формирование закладочных массивов при разработке алмазных месторождений в криолитозоне. М., Горная книга, 597.  
Montyanova A.N. 2009. Formirovanie zakladochnykh massivov pri razrabotke almaznykh mestorozhdeniy v kriolitozone [Formation of stowing massif in the development of diamond deposits in permafrost]. Moscow, Gornaya kniga, 597. (in Russian)
4. Шендрик В.К., Волощенко В.Л., Комчугов А.А. 1980. Типовая технологическая инструкция производства закладочных работ на горнорудных предприятиях Минчермета УССР. Кривой Рог, НИГРИ: 83.  
Shendrik V.K., Voloshchenko V.L., Komchugov A.A. 1980. Tipovaya tekhnologicheskaya instruktsiya proizvodstva zakladochnykh rabot na gornorudnykh predpriyatiyakh Minchermeta USSR [The typical technological instruction of filling operations production at the mining enterprises of Minchermeta USSR]. Krivoy Rog, NIGRI: 83. (in Russian)