УДК
622.27:622.7

**В.С. Святецкий, Е.В. Кузьмин, А.А. Морозов, В.С. Филоненко**

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СГУЩЕНИЯ ХВОСТОВ ПЕРЕРАБОТКИ УРАНОВЫХ РУД ПАО «ППГХО» С ПОМОЩЬЮ ФЛОКУЛЯНТОВ

Установлена возможность сгущения хвостов переработки урановых руд с помощью флокулянтов в смесителях, для использования их в качестве пастовой закладки подземного пространства рудников. Сделан подбор флокулянтов, обеспечивающих сгущение хвостов переработки урановых руд с первоначальным содержанием твердого 34,5% до содержания твердого 55–60%, при сохранении возможности транспортирования материала пастовой закладки по трубопроводу. Паста, содержащая воду до 20% в связанном виде, не растворяется и не размывается водой, может быть складирована в камерах на удаленных участках, не связанных с текущими горными работами.

Ключевые слова: пастовая закладка, твердеющий состав, сгущение, флокулянт, хвосты переработки руды, вязкость материала.

Паста – плотный гелеобразный материал, образуемый из хвостов переработки руд, способный к транспортированию по трубам. Основу его формируют мелкие шламовые частицы (-20 мкм), связанные флокулянтами в крупные флокулы. Пески и породные частицы не выпадают в осадок благодаря высокой плотности образуемых флокул.

Увеличение плотности материала пасты может достигаться тремя известными способами: с помощью пастового сгустителя, сгущение через фильтр (выдавливание воды), сгущение с помощью центрифуги. Второй и третий способы сгущения в данном случае неэффективны из-за отсутствия условий для процесса коагуляции шламовой части хвостов с флокулянтами.

В пастовом сгустителе (цистерне диаметром до 30 м и высотой до 10–15 м, с механическим перемешиванием сгущаемого продукта) шламовые частицы с помощью флокулянта объединяются в крупные тяжелые гелеобразные флокулы. С помощью вращающихся граблин свободная (осветленная) вода выводит-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. С. 229–237.
© 2017. В.С. Святецкий, Е.В. Кузьмин, А.А. Морозов, В.С. Филоненко.

ся на верхний уровень сгустителя и удаляется. Тяжелые гелеобразные флокулы осаждаются в нижней части, и чем дольше этот процесс происходит, тем плотнее получаемая в донной части паста за счет выдавливания (верхними слоями сгущенного продукта) из нее свободной воды [1].

Столб подаваемой смеси из хвостов ГМЗ и раствора флокулянтов для приготовления пастовой закладки должен быть достаточно высоким, в промышленном масштабе -10–15 м, чтобы в нижней части формировалось высокое давление сжатия. В лабораторных условиях это требование в полной мере не выполняется, т.к. высота столба равна 1000 мм, поэтому предельно высокой плотности пасты на лабораторной установке получить не удается.

В этой связи, для моделирования пасты промышленных аппаратов, продукт полученный сгущением в лабораторных условиях с расходом флокулянта ПАА КНР ~60 г/т твердого обезвоживался до кондиции пасты путем вакуумной вытяжки из него жидкой фазы. Качество продукта контролировалось, как отрабатываемой методикой определения напряжения сдвига [1], так и традиционным анализом плановых Ж/Т путем сушки проб получаемых паст.

Гранулометрический состав материала определен в ЦНИЛ ПАО «ППГХО» из образцов хвостов, отобранных для испытаний и при установившейся технологии переработки алюмосиликатного сырья существенно не меняется в последние 5–7 лет, несмотря на загрубление его помола.

Гранулометрический состав материала, особенно частицы размером – 20 мкм, определяет реологические свойства пасты, такие как вязкость и напряжение сдвига. Хвосты ГМЗ ПАО «ППГХО» имеют достаточное количество (40%) тонких частиц для получения пасты с необходимыми реологическими свойствами.

С использованием существующей методики исследований сгущаемости рудных пульп проведены работы по определению типа флокулянта в целях обеспечения максимальной скорости осаждения твердого из пульпы хвостов ГМЗ в зависимости от расхода флокулянта. Преимущественно использовались в работах анионные, катионные и неионогенные флокулянты на основе (со-)полимеров акриламида. Флокулянты – синтетические высокомолекулярные полимеры, растворяемые в воде, разной степени плотности ионизации и разного молекулярного веса, применяемые для осветления, сгущения, фильтрования и центрифугирования в процессах обогащения и переработки сырья.

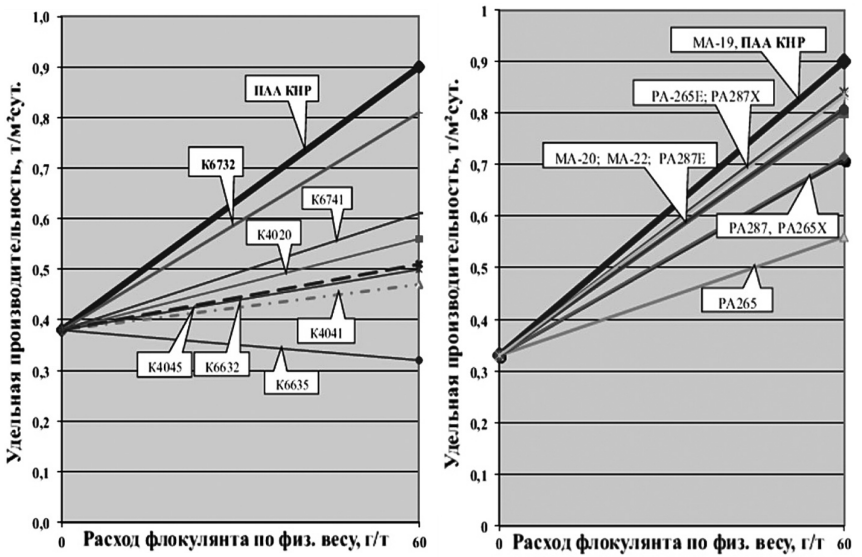
Данные флокулянты не являются токсичными и распространены на перерабатывающих предприятиях. Возможными для использования, по результатам ранее проведенных работ, являются флокулянты Magnaflok 919, Magnaflok 155, Magnaflok 10, Magnaflok 342, имеющие примерно равные результаты по скорости осаждения твердого, а также флокулянты проверенные в условиях ЦНИЛ: BEESFLOK (марки K6732, см. рис. 1, *а*), FLONOR (марок MA-19, MA-20, MA-22, PA-265E, PA-287E, PA-287X, см. рис. 1, *б*) и используемый на ГМЗ для сгущения рудных пульп ПАА КНР. При постановке серии опытов по сгущению хвостов с расходом ПАА КНР в пределах 30–180 г/т твердого пульпы определен рациональный расход флокулянта на уровне 60–90 г/т (несущественно отличающийся от регламентируемого для рудных пульп). Установлено также, что возможна интенсификация сгущения хвостов с ростом расхода флокулянта, однако отмечается тенденция снижения уплотнения сгущенных пульп (см. рис. 1, *в*). В этой связи, вопросы оптимизации процесса могут определяться в условиях ОПР с имитацией процесса в промышленном аппарате (либо в полупромышленном аппарате ∅100–200 мм, моделирующем процесс по высоте пастового сгустителя), – для коррекции характеристик пастового продукта с учетом экономических факторов.

Вместе с тем, моделируемый в лабораторных условиях пастовый продукт по основным характеристикам: крупности, вязкости Ж/Т, содержанию в нем флокулянта максимально приближен к базовому прогнозируемому компоненту для пастовой закладки.

Испытания с различной концентрацией раствора флокулянта используемого на ГМЗ достаточно хорошо согласуются с данными полученными в ходе ОПР выполненных компанией АО «Тране Текник», что максимальная скорость осаждения твердого достигается при концентрации 5% массовых (плотность раствора 1,034 г/л, [2, 3]). Приведенные зависимости получены на основании анализа и обработки результатов лабораторных исследований, выполненных компанией АО «Тране Теккник» при использовании лежалых хвостов переработки урановых руд ПАО «ППГХО».

Основным реологическим параметром материала пастовой закладки, характеризующим ее технологические свойства является вязкость или сопротивление на сдвиг. По данному показателю делается выбор насосного оборудования, диаметр трубопроводов для подачи пасты в подземные камеры, места врезки

а) б)




***а) Показатели сгущения хвостовой пульпы с использованием флокулянтов «BESFLOK»***

Содержание класса +0,1 мм в твердом – 8,4%. Плотность пульпы – 1250 г/дм$^3$.
Примечание: А – удельная производительность сгущения, т/м$^2$сут;
R – уплотнение пульпы, м$^3$/т.

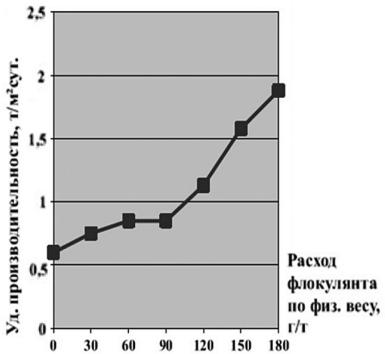
| Расход ПАА, г/т | *ПАА КНР* | | неионоген. | | анионные | | | | катионные | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | К4020 | | К4041 | | К4045 | | К6632 | | К6635 | | *К6732* | | К6741 | |
| | А | R | А | R | А | R | А | R | А | R | А | R | А | R | А | R |
| 0 | 0,4 | 1,41 | 0,4 | 1,4 | 0,4 | 1,4 | 0,4 | 1,4 | 0,4 | 1,4 | 0,4 | 1,4 | 0,4 | 1,4 | 0,4 | 1,4 |
| 60 | 0,9 | 1,6 | 0,6 | 1,6 | 0,5 | 1,4 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 0,3 | 1,7 | 0,8 | 1,6 | 0,6 | 1,6 |

***б) Показатели сгущения хвостовой пульпы с использованием флокулянтов «FLONOR»***

Содержание класса +0,1 мм в твердом – 8,4%. Плотность пульпы – 1250 г/дм$^3$.
Примечание: А – удельная производительность сгущения, т/м$^2$сут;
R – уплотнение пульпы, м$^3$/т.

| Расход ПАА, г/т | *ПАА КНР* | | Показатели сгущения с анионными реагентами «FLONOR» | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | *МА19* | | *МА20* | | *МА22* | | РА265 | | *РА265Е* | | РА265Х | | РА287Е | | РА287Х | |
| | А | R | А | R | А | R | А | R | А | R | А | R | А | R | А | R | А | R |
| 0 | 0,3 | 1,3 | 0,3 | 1,3 | 0,3 | 1,3 | 0,3 | 1,3 | 0,3 | 1,3 | 0,3 | 1,3 | 0,3 | 1,3 | 0,3 | 1,3 | 0,3 | 1,3 |
| 60 | 0,9 | 1,6 | 0,9 | 1,6 | 0,8 | 1,5 | 0,8 | 1,5 | 0,6 | 1,6 | 0,8 | 1,6 | 0,7 | 1,5 | 0,8 | 1,6 | 0,8 | 1,6 |

*Рис. 1. Показатели сгущения хвостовой пульпы с использованием флокулянтов: (а), (б)*




***в) Показатели сгущения хвостовой пульпы в зависимости от расхода ПАА КНР***

Содержание класса +0,1 мм в твердом – 8,4%.

Плотность пульпы – 1250–1159 г/дм$^3$.

Примечание: А – удельная производительность сгущения, т/м$^2$сут; R – уплотнение пульпы, м$^3$/т.

| Расход ПАА по физ. весу, г/т | Показатели сгущения | |
|---|---|---|
| | A | R |
| 0 | 0,6 | 1,4 |
| 30 | 0,8 | 1,5 |

*Рис. 1. Показатели сгущения хвостовой пульпы с использованием флокулянтов: (в)*

форсунок для добавления цемента или других вяжущих, подачи воздуха для ускорения движения закладки по трубам и другие.

Напряжение сдвига может быть определено с помощью вискозиметра либо путем проведения теста на «определение осадки конуса». Тест заключается в следующем: полый цилиндр высотой 10 см наполняется пастой. Далее цилиндр медленно поднимается и измеряется расстояние между высотой цилиндра и верхней точкой конуса пасты. Данная величина (расстояние)

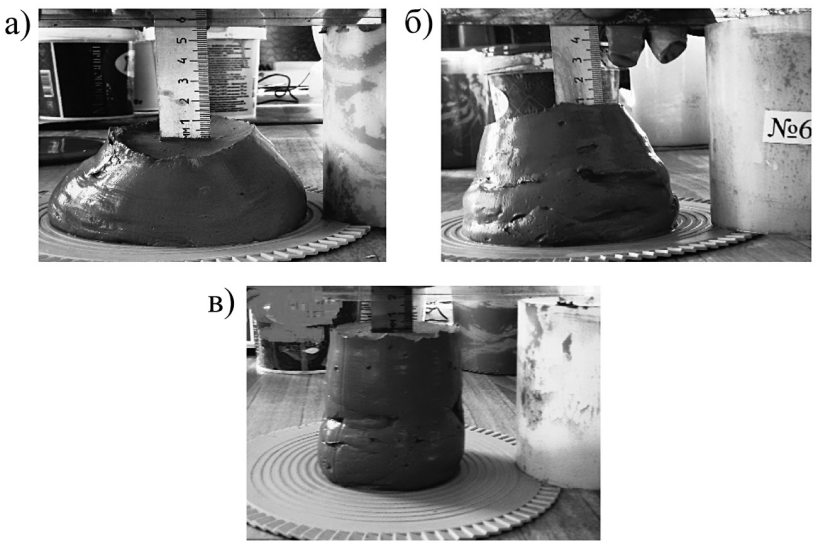



*Рис. 2. Определение вязкости пастовой закладки по величине осадки конуса: при содержании твердого 53% (а); при содержании 58% (б); при 62% (в)*

| № проб | Проба пастового продукта из хвостов ГМЗ | | | | Осадка (*S*) цилиндра | % сохранения *H* | *S/H* | √*S/H* | Напряжение (τ) сдвига |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | % ж.ф. | % т.ф. | м²/т | тв г/дм³ | мм | % | | | |
| 1 | 57 | 43 | 1,32 | 775 | 66 | 34 | 0,66 | 0,81 | 0,09 |
| 2 | 53 | 47 | 1,12 | 665 | 65 | 35 | 0,65 | 0,81 | 0,10 |
| 3 | 50 | 50 | 1,02 | 715 | 62 | 38 | 0,62 | 0,79 | 0,11 |
| 4 | 47 | 53 | 0,87 | 795 | 56 | 44 | 0,56 | 0,75 | 0,13 |
| 6 | 42 | 58 | 0,73 | 895 | 48 | 52 | 0,48 | 0,69 | 0,15 |
| 7 | 38 | 62 | 0,61 | 1005 | 18 | 82 | 0,18 | 0,42 | 0,29 |

называемая «осадкой» необходима для расчета напряжения сдвига. Исследования реологических свойств получаемого материала пастовой закладки проведены с помощью измерения величины осадки конуса (рис. 2). Испытания по измерению осадки конуса исходных образцов пастовой закладки проведены с пастой различной плотности, результаты приведены в таблице.

В основу измерения напряжения сдвига посредством высоты осадки конуса положено уравнение, описывающее конеч-

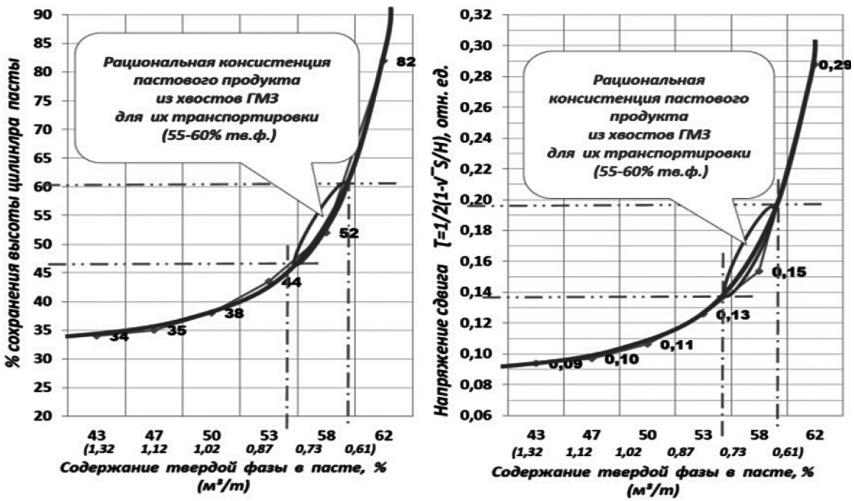



*Рис. 3. Кривые напряжения сдвига: зависимость вязкости пастовой закладки на основе хвостов от содержания твердого (хвосты ГМЗ ПАО «ППГХО»)*

ную зависимость между высотой осадки материала и величиной напряжения сдвига:

$$s' = 1 - \tau'_y \cdot \left(1 - \ln\left(\tau'_y\right)\right),$$

где $\tau'_y$ – напряжение сдвига в безразмерных единицах,

$$\tau'_y = \frac{\tau y}{\rho \cdot g \cdot H};$$

$s'$ – высота осадки в безразмерных единицах, $s' = s/H$.

Подставив приближенную величину первого члена бесконечных рядов для $\ln(x)$ в (1) и решая уравнение относительно $\tau'_y$ получаем:

$$\tau'_y = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{s'}$$

На основе проведенных экспериментов по определению высоты осадки конуса составлена таблица результатов, получена зависимость напряжения сдвига от содержания твердого в пастовой закладке (рис. 3).

Для данной исходной пасты оптимальная концентрация твердого в пасте лежит в пределах от 50 до 60%. Конструкция пастового сгустителя, расчет насосов и трубопроводов будут основаны на данной кривой напряжения сдвига, определяемой содержанием твердого.

Проведение испытаний на прочность образцов пастовой закладки при различном содержании твердого, соотношениях Т:Ж = 50:50, 55:45, 60:40, в периоды отверждения 7, 14, 28 суток показало, что в условиях, приближенных к температуре и влажности нахождения в отработанной камере, исходный материал пастовой закладки представляет собой вязкую массу не имеющую собственной прочности. Прочность на сжатие, сдвиг, несущую способность исходная паста в указанный период не набирает.

**Выводы**

1. Исследования по моделированию получения пастового материала из пульпы хвостов ГМЗ позволили:

• определить эффективность действия различных марок флокулянта, выбрать наиболее рациональный для использования и его оптимальную дозу для достижения максимальной скорости осаждения твердого;

• провести оценку реологических характеристик исходной пасты, установить зависимость вязкости состава от содержания твердого.

2. Исследования вязкости исходной пастовой закладки позволили выявить: 55–60% содержания твердого в оптимальной по вязкости исходной пасте указывает на наличие резерва вязкости, который может быть использован, – т.е. имеется возможность добавления дробленого твердого инертного породного наполнителя при сохранении оптимальной вязкости с увеличением содержания твердого для набора прочности пастовой закладки.

3. Исходная пастовая закладка, сформированная хвостами ГМЗ с добавлением в них раствора флокулянтов, представляет собой вязкую густую массу, не имеющую прочность, и не набирающую ее во времени при размещении в выемочных камерах подземных рудников. В подземных условиях исходная пастовая закладка может использоваться для заполнения изолированных выемочных камер, где не имеется контактов с камерами, находящимися в отработке.

4. Паста имеет двойное назначение: является технологическим носителем для более крупных частиц породной закладки при транспортировке, и при добавлении вяжущих – материалом, имеющим собственную прочность, обеспечивающую поддержание боковых пород.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Обоснование* и проведение полупромышленных испытаний по использованию пастового сгущения хвостов для обратного заполнения ими отработанных горных выработок. Итоговый отчет по выполнению научно-исследовательской работы. – Электросталь: ЗАО «Транe Текник», 2011.

2. *Святецкий В.С.* Исследования возможности пастовой закладки камер на основе хвостов переработки урановых руд ПАО «ППГХО» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 9. – С. 10–13.

3. *Святецкий В.С.* Установление напряжения сдвига и прочности пастовой закладки на основе хвостов переработки урановых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 10. – С. 37–40. ГИАБ

**КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Святецкий Виктор Станиславович* – первый заместитель генерального директора –исполнительный директор, АО «Атомредметзолото» ГК «Росатом», e-mail: info@armz.ru,

*Кузьмин Евгений Викторович* – доктор технических наук, профессор, начальник лаборатории, АО «ВНИПИпромтехнологии», e-mail: Kuzmin.E.V@vnipipt.ru,

*Морозов Александр Анатольевич*[1] – кандидат технических наук, начальник ЦНИЛ, e-mail: MorozovAA@ppgho.ru,
*Филоненко Виктор Степанович*[1] – зам. начальника технологической лаборатории ЦНИЛ,
[1] ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение».

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 4, pp. 229–237.

UDC 622.27:622.7

**V.S. Svyatetskiy, E.V. Kuz'min, A.A. Morozov, V.S. Filonenko**

# TEST DATA ON THICKENING OF URANIUM ORE TAILINGS USING FLOCCULANTS AT PRIARGUNSKY MINING AND CHEMICAL WORKS

The article addresses capabilities of uranium ore tailings thickening with flocculants in mixing machines to manufacture paste backfill. The selected flocculants ensure thickening of uranium ore tailings with the initial solids content of 34.5% up to the solids content of 55–60% at the sustained flowability of the resultant paste backfill in a pipeline. The paste backfill with the associated water content of up to 20% is insoluble and unwashed, and can be stocked in rooms in remote mine sites unconnected with actual mining.

Key words: paste backfill, solidifying composition, thickening, flocculant, ore processing tailings, material viscosity.

**AUTHORS**

*Svyatetskiy V.S.*, First Deputy General Director – Executive Director, ARMZ Uranium Holding Co. (JSC «Atomredmetzoloto»), 109004, Moscow, Russia, e-mail: info@armz.ru,
*Kuz'min E.V.*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Laboratory, e-mail: Kuzmin.E.V@vnipipt.ru,
*Morozov A.A.*[1], Candidate of Technical Sciences, Head of Central Research Laboratory, e-mail: MorozovAA@ppgho.ru,
*Filonenko V.S.*[1], Deputy Head of Technological Laboratory, Central Research Laboratory,
[1] «Priargunsky Industrial Mining and Chemical Union» JSC, 674673, Zabaykalsky region, Krasnokamensk, Russia.

**REFERENCES**

1. *Obosnovanie i provedenie polupromyshlennykh ispytaniy po ispol'zovaniyu pastovogo sgushcheniya khvostov dlya obratnogo zapolneniya imi otrabotannykh gornykh vyrabotok*. Itogovyy otchet po vypolneniyu nauchno-issledovatel'skoy raboty (Substantiation and execution of semi-commercial trial of thickening of tailings up to paste for backfilling.. Research report), Elektrostal, ZAO «Trane Teknik», 2011.
2. Svyatetskiy V. S. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 9, pp. 10–13.
3. Svyatetskiy V. S. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 10, pp. 37–40.