

Оценка попутной концентрации тяжелых минералов при гидротранспорте пульпы в трубопроводе

Багазеев В. К.¹, Бойков И. С.^{1*}, Валиев Н. Г.¹, Здоровец И. Л.²

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

² Артель старателей «Нейва», г. Невьянск, Свердловская область, Россия

*e-mail: i.boikov@bk.ru

Реферат

Введение. При разработке россыпных месторождений, содержащих тяжелые минералы в небольших количествах, целесообразно использовать гидромеханизированную технологию, включающую попутную концентрацию этих минералов, имеющую существенное значение для предварительного обогащения песков.

Цель работы. Оценка попутной концентрации тяжелых минералов в придонном слое трубопровода и выделение этого слоя из общего потока при гидротранспорте пульпы при разработке россыпей землесосными снарядами.

Методология. На основе анализа закономерностей гидротранспорта пульпы, гранулометрического распределения песков и результатов физического моделирования процесса в лабораторных условиях приводится аналитическое обоснование параметров попутной концентрации тяжелых минералов. Основные положения оценки попутной концентрации: при гидротранспорте песков в трубопроводе образуется придонный слой крупных и тяжелых частиц, перемещающихся в виде волочения и перекатывания, при этом распределение частиц по крупности и плотности в поперечном сечении потока пульпы соответствует формуле Розина–Рамлера.

Результаты. Приводятся результаты лабораторного исследования взвешивания тяжелых частиц из придонного осадка, измерения скорости взвешивания для тяжелых минералов и кварцевого песка. Полученные результаты аппроксимированы формулой. Приводится пример аналитической оценки возможности попутной концентрации тяжелых минералов.

Выводы. Использование попутной концентрации без изменения технологической схемы разработки существенно повысит эффективность последующих процессов обогащения при разработке россыпных месторождений.

Ключевые слова: земснаряд; гидротранспорт; осадкообразование; попутная концентрация тяжелых минералов.

Введение. При разработке россыпных месторождений, содержащих тяжелые минералы (золото, титан, циркон) в небольших количествах, целесообразно использовать технологии, включающие попутную концентрацию этих минералов, имеющую существенное значение для предварительного обогащения песков.

Целью работы является оценка попутной концентрации тяжелых минералов в придонном слое трубопровода и выделение этого слоя из общего потока при гидротранспорте пульпы.

Методология. Большинство редкометалльных россыпей представлены практически однородным тонкозернистым материалом крупностью менее 1 мм, с удельным сцеплением 7–10 кПа и углом внутреннего трения ~ 35°.

Такие грунты по трудности разработки методами гидромеханизации относятся («Единые нормы и расценки на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы. Сборник Е2. Земляные работы. Выпуск 2. Гидромеханизированные земляные работы» (утв. Постановлением Госстроя СССР от 05.12.86 № 43/512/29-50)) к первой категории с удельным расходом воды при разработке гидромониторами – 4,5 м³/м³, при разработке землесосными снарядами – 6,5 м³/м³[1, 2].

На основе анализа закономерностей гидротранспорта пульпы, гранулометрического распределения песков и результатов физического моделирования процесса в лабораторных условиях приводится аналитическое обоснование параметров попутной концентрации тяжелых минералов.

Основные положения оценки попутной концентрации: при гидротранспорте песков в трубопроводе образуется придонный слой крупных и тяжелых частиц, перемещающихся в виде волочения и перекачивания, при этом распределение частиц по крупности и плотности в поперечном сечении потока пульпы соответствует формуле Розина–Рамллера.

Таблица 1. Критические скорости движения пульпы $v_{кр}$, м/с
Table 1. Pulp critical speed v_{cr} , m/s

Грунт	D_y пульпопровода, мм	Консистенция пульпы		
		Т : Ж = 1 : 5	Т : Ж = 1 : 10	Т : Ж = 1 : 15
Песчано-гравелисто-галечный с содержанием гравия и гальки свыше 50 %	400	4,50	4,03	3,74
	500	5,00	4,46	4,20
	600	5,48	4,95	4,60
Песчано-гравелистый с содержанием гравия и гальки 20–45 %	400	3,87	3,57	3,28
	500	4,34	3,90	3,64
	600	4,76	4,28	4,00
Крупнозернистые пески с содержанием гравия до 10 %	400	3,32	2,94	2,76
	500	3,67	3,30	3,08
	600	4,04	3,60	3,40
Мелкозернистые пески	400	2,77	2,48	2,32
	500	3,10	2,88	2,58
	600	3,42	3,00	2,86

Результаты. Авторами рассматривается возможность попутной концентрации песков по крупности и плотности при разработке россыпных месторождений земснарядами [3, 4]. Необходимая для обогащения дезинтеграция обеспечивается в результате грунтозабора и при прохождении песков через грунтовой насос. Попутная концентрация по крупности и плотности происходит при напорном гидротранспорте в трубах, а также в штабеле при намыве песков. При разработке сравнительно однородных песков концентрация происходит в основном по плотности.

При гидротранспорте под средней скоростью v_{cp} понимается скорость, при которой движение мелких и легких частиц обеспечивается во взвешенном состоянии, а крупных и тяжелых частиц – в придонном слое без заиливания.

Скорость потока, при малейшем уменьшении которой происходит выпадение частиц в осадок, называют критической $v_{кр}$. Для расчета критической скорости принято несколько методик: для диапазона крупности частиц 0,07–1,5 мм – формула В. С. Кнороза, для диапазона 0,01–0,15 мм – формула А. Е. Смолдырева и др. При разработке россыпей землесосными снарядами в качестве нормативных рекомендуются [1, 5] следующие значения (табл. 1).

Соотношение значений средней и критической скорости обуславливает режим транспортирования гидросмеси (рис. 1).

В режиме I частицы взвешены по всему сечению трубы, при этом $v_{cp} > v_{кр}$; режим II – это начальная стадия расслоения частиц, когда $v_{cp} = (1,02–1,05) v_{кр}$; в режиме III происходит частичное заиливание в придонной части трубопровода.

При разработке мелкозернистых песков практикуется [1, 6] гидротранспортирование при равенстве или незначительном превышении критической скорости (режим II), в этом случае увеличение средней скорости повышает надежность гидротранспорта, а снижение – повышает износоустойчивость труб. При небольшой дальности гидротранспортирования допускается III режим, при этом заиливание трубопровода не должно превышать 10 % его диаметра. При таком режиме

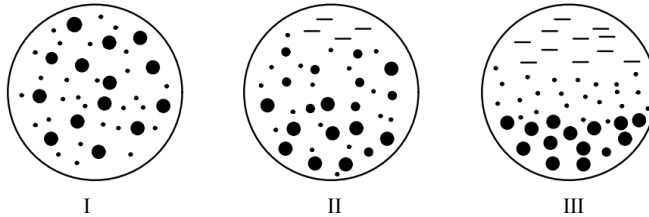


Рис. 1. Распределение твердых частиц в потоке пульпы при напорном гидротранспорте:

I, II, III – режимы транспортирования

Fig. 1. Solid particles distribution in a pulp flow at pressurized hydrotransport:

I, II, III – transportation modes

незначительно увеличиваются потери напора в пульповоде, однако происходит максимальное расслоение тяжелых крупных и легких мелких частиц. Этот режим используется в гидромеханизации для сгущения пульпы в горизонтальных сгустителях (с диафрагмой или без диафрагмы) [7]. На рис. 2 приводится схема сгустителя без диафрагмы [8].

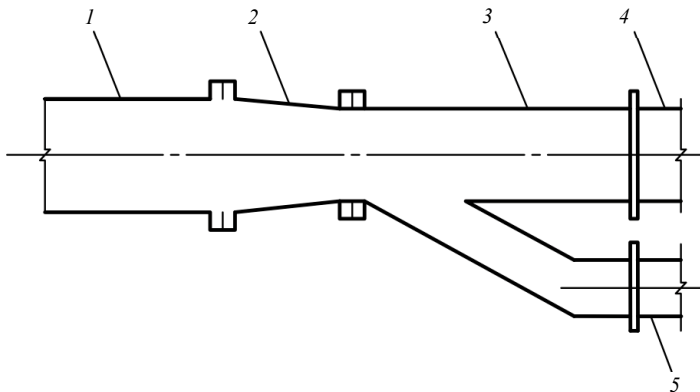


Рис. 2. Схема сгустителя горизонтального типа:

1 – пульповод от земснаряда; 2 – переходник; 3 – отстойник; 4 – осветленная пульпа; 5 – сгущенная пульпа

Fig. 2. Horizontal condenser diagram:

1 – pulp pipeline from the dredger; 2 – coupling; 3 – sedimentation tank; 4 – clarified pulp; 5 – thickened pulp

При гидротранспорте однородных песков расслоения по крупности практически не происходит, не происходит и существенного сгущения пульпы. Наблюдается концентрация тяжелых частиц в придонной части потока, а сгуститель предназначен в основном для разделения потока на верхнюю и нижнюю (придонную) части. Таким образом, сгуститель по конструкции является приточным

тройником – технологическим приспособлением для выделения придонной части потока [7, 9].

Расслоение частиц по плотности является предпосылкой попутной концентрации частиц тяжелых минералов. Установка приточных тройников для разделения потоков предусматривается на горизонтальных участках пульповода небольшой длины непосредственно перед намывом нижней части пульпы в отдельный штабель. Верхнюю часть в зависимости от содержания полезного минерала направляют на дальнейшую переработку (в штабель резерва) или в гидроотвал.

Для оценки попутной концентрации тяжелых минералов в нижнем потоке в данном исследовании принимаются следующие положения:

– процесс образования придонного слоя тяжелых минералов рассматривается не как процесс осаждения взвешенных частиц в потоке пульпы, а как процесс сдвижения, волочения и перекачивания частиц образовавшегося в трубопроводе осадка;

– разделение частиц в поперечном сечении потока аналогично распределению частиц по крупности по формуле Розина–Раммлера [2, 10].

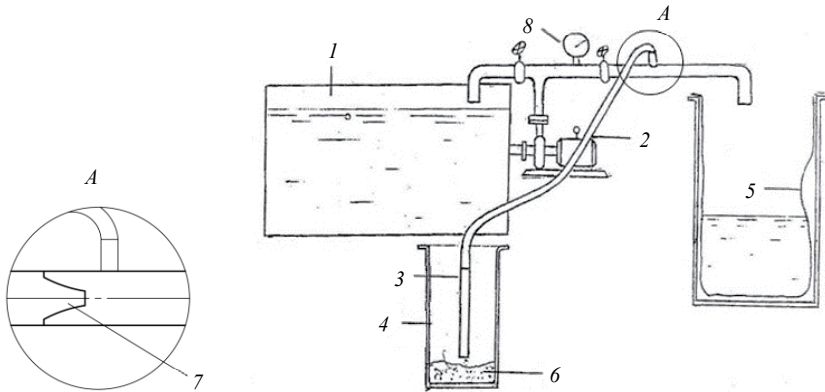


Рис. 3. Схема лабораторной установки для всасывания и подъема частиц породы: 1 – бак; 2 – переходник; 3 – стеклянный наконечник; 4 – стеклянный сосуд; 5 – полиэтиленовая пленка; 6 – транспортируемый грунт; 7 – насадка; 8 – манометр

Fig. 3. Diagram of the laboratory facility for rock particles suction and lifting: 1 – tank; 2 – adapter; 3 – glass nozzle; 4 – glass container; 5 – polyfilm; 6 – transported soil; 7 – cap; 8 – manometer

Для характеристики процесса перемещения придонного слоя пульпы по аналогии с передвижением пульпы по шлюзам воспользуемся коэффициентом равносторонности П. В. Лященко [11]. Коэффициент равносторонности $e_{ск}$ – это отношение размеров частиц различной плотности, которые начинают движение по дну шлюза при одинаковой скорости движения пульпы или воды:

$$e_{ск} = e_{рп} \frac{f_{т}}{f_{л}}, \quad e_{ск} = \frac{d_{т}}{d_{л}} = \frac{(\rho_{т} - 1) f_{т}}{(\rho_{л} - 1) f_{л}}, \quad (1)$$

где $e_{рп}$ – коэффициент равнопадаемости [12]; $f_{т}, f_{л}$ – коэффициенты трения тяжелого и легкого зерна; $d_{л}, d_{т}$ – эквивалентные диаметры крупной и легкой частицы и, соответственно, мелкой и тяжелой частицы; $\rho_{т}, \rho_{л}$ – плотность тяжелой и легкой частицы.

В экспериментах (рис. 3) использовались кварцевый песок $\rho_{т} = 2,65 \text{ т/м}^3$, в измельченном виде халькопирит $\rho_{т} = 4,7 \text{ т/м}^3$, медь $\rho_{т} = 8,35 \text{ т/м}^3$, монетный сплав

$\rho_T = 10,5 \text{ т/м}^3$, золото $\rho_T = 17,0 \text{ т/м}^3$. Фиксировались: расстояние от наконечника до осадка, расход воды, момент начала движения (подъема) частиц, масса частиц, момент витания частиц [12].

Результаты измерений и расчетов для кварца, халькопирита, меди и золота приводятся в табл. 2.

Получена экспериментальная зависимость равноскоростного диаметра частиц кварцевого песка от диаметров тяжелых частиц:

$$d_{\text{л}} = e^{-1,15} d_T \exp(a e_{\text{рп}} d_T), \quad (2)$$

где $d_{\text{л}}$, d_T – эквивалентные диаметры крупной и легкой частицы, мм; a – параметр, для частиц золота $a = 5,15$, для халькопирита $a = 1,85$, для меди $a = 4,65$.

Таблица 2. Коэффициент равноскоростности частиц
Table 2. The coefficient of particles isospeed

Песок		Соответствующая крупность частиц, мм			Коэффициент равноскоростности частиц песка			Соотношение коэффициентов $f = e_{\text{ск}}/e_{\text{рп}}$		
Крупность, мм	Скорость, м/с	халькопирита	меди	золота	халькопирита	меди	золота	халькопирита	меди	золота
3,00	0,28	0,60	0,210	0,120	5,00	14,30	25,00	2,20	3,20	2,57
1,00	0,22	0,45	0,150	0,105	2,22	6,70	9,50	1,00	1,50	1,00
0,50	0,18	0,32	0,130	0,090	1,56	3,85	5,55	0,70	0,90	0,60
0,25	0,14	0,25	0,100	0,080	1,00	2,50	3,12	0,44	0,56	0,32
0,10	0,08	0,09	0,065	0,062	1,00	1,60	1,60	0,44	0,34	0,16

Распределение измельченных частиц по крупности по формуле Розина–Раммера [2, 10]:

$$R_i = 100 \exp \left[- \left(\frac{d_i}{d_e} \right)^b \right],$$

где R_i – суммарный выход частиц «+», %; d_i – крупность частиц, мм; d_e – крупность частиц, соответствующая выходу $R = 63,2$ %; b – параметр распределения частиц по крупности.

Для целей исследования преобразуем формулу к виду:

$$r = \exp \left[-3 \left(\frac{d_i}{d_H} \right)^b \right], \quad (3)$$

где r – суммарный выход частиц «+», доли ед.; d_H – номинальная крупность частиц, мм, соответствующая выходу $R = 5$ %; $b = 0,94(\lg K_H)^{-1}$; K_H – коэффициент неоднородности песков по крупности [13]; $K_H = d_{60}/d_{10}$, d_{60} , d_{10} – контролирующий и эффективный диаметр гранулометрического состава, мм.

В таком виде формула характеризует гранулометрический состав песков россыпи по крупности и неоднородности.

Применительно к распределению частиц по поперечному сечению потока пульпы d_n характеризует крупность транспортируемого песка для определения скорости транспортирования потока пульпы, мм; d_T – крупность тяжелых частиц в составе придонного слоя, мм; d_l – равнораспределенная крупность легких частиц, находящихся также в составе придонного слоя, мм.

Таким образом, большая часть тяжелых полезных минералов и равнораспределенных частиц песка составляет придонный слой потока. Остальные, крупностью меньше, чем равнораспределенные, и взвешиваемые из придонного слоя тяжелые частицы выносятся верхним потоком. Дополнительное взвешивание тяжелых частиц происходит при прохождении непосредственно через тройник, который является местным гидравлическим сопротивлением.

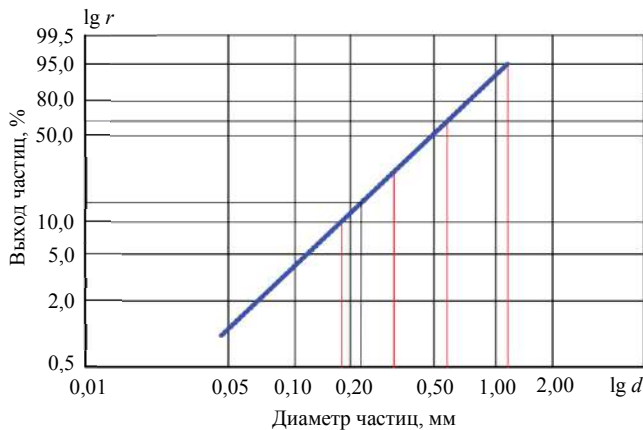


Рис. 4. График гранулометрического состава песков (двойная логарифмическая координатная сетка)

Fig. 4. Sand granulometric composition graph (log-log coordinate grid)

При прохождении тройника как в прямоточной части, так и в ответвлении трубопровода возникают потери энергии потока (напора). В зависимости от соотношения расходов при разделении потока разница потерь энергии достигает 20–30 % [9, 14]. Это соотношение, по мнению авторов, распространяется и на величину концентрации тяжелых частиц между верхним и нижним трубопроводами.

Рассмотрим пример расчета попутной концентрации тяжелых частиц.

Исходные данные. Пески мелкозернистые (рис. 4), номинальная крупность $d_n = 1,0$ мм, коэффициент неоднородности $k_n = 3,0$. Плотность частиц песка $\rho_l = 2,65$ т/м³, тяжелых частиц $\rho_{хп} = 4,7$ т/м³, $\rho_3 = 17,0$ т/м³. Полезные минералы содержатся во фракции $d_T = 0,1–0,044$ мм, содержание полезных минералов $C_{хп} = 5,0–7,0$ кг/м³, $C_3 = 67$ мг/м³ [15].

Земснаряд развивает производительность $Q_n = 880$ м³/ч = 0,224 м³/с, при $T : Ж = 1 : 10$, производительность по пескам $Q_T = 80$ м³/ч = 0,222 м³/с, возможность заиливания труб до 10 % диаметра трубопровода [4, 13].

Решение.

1. По табл. 1 принимаем $v_{кр} = 2,8$ м/с.

2. По величине $Q_n = 0,224$ м³/с и $v_{кр} = 2,8$ м/с по известным формулам [10] рассчитываем: диаметр общего трубопровода $D_n = 0,32$ м (без округления до стандартных размеров), расход прямоточного потока после тройника $Q_{пр} = 0,182$ м³/с, $D_{пр} = 0,288$ м, расход нижнего потока $Q_{от} = 0,04$ м³/с, диаметр отвода $D_{от} = 0,135$ м, степень разделения $n = 4,55$.

3. Диаметр легких частиц песка, равнораспределенных фракций тяжелых ($\rho = 4,7 \text{ т/м}^3$) рассчитывается по формуле (2), где $d_{\text{хп}} = 0,1 \text{ мм}$; $e_{\text{рп}} = 2,24$; $a = 1,85$:

$$d_{\text{л}} = 2,24^{-1,15} \cdot 0,1 \exp(1,85 \cdot 2,24 \cdot 0,1) = 0,062 \text{ мм.}$$

Диаметр $d_{\text{л}} = 0,062 \text{ мм}$ практически соответствует фракции тяжелых частиц $(-0,1+0,047) \text{ мм}$, что исключает возможность при скорости потока $v_{\text{ср}} \approx 2,8 \text{ м/с}$ концентрации по плотности в придонном слое.

4. Диаметр равнораспределенных частиц плотностью $\rho_3 = 17,0 \text{ т/м}^3$ при $d_3 = 0,1 \text{ мм}$; $e_{\text{рп}} = 9,7$; $a = 5,15$:

$$d_{\text{л}} = 9,7^{-1,15} \cdot 0,1 \exp(5,15 \cdot 9,7 \cdot 0,1) = 1,08 \text{ мм;}$$

при $d_3 = 0,047 \text{ мм}$

$$d_{\text{л}} = 9,7^{-1,15} \cdot 0,047 \exp(5,15 \cdot 9,7 \cdot 0,047) = 0,038 \text{ мм.}$$

Диаметр $d_{\text{л}} = 0,038 \text{ мм}$ практически соответствует нижнему диапазону фракций тяжелых частиц, что исключает возможность концентрации в придонном слое. Диаметр $d_3 = 0,1 \text{ мм}$ ($d_{\text{л}} > d_3$) – возможна концентрация тяжелых частиц в придонном слое.

5. Выход частиц $d_{\text{л}} = 1,08 \text{ мм}$ в придонный слой рассчитываем по формуле (3), где $d_i = 1,08 \text{ мм}$; $d_{\text{н}} = 1,12 \text{ мм}$; $k_{\text{н}} = 3,0$; $b = 2$:

$$r = \exp \left[-3 \left(\frac{1,08}{1,12} \right)^b \right] = 0,088, \text{ или } 8,8 \text{ \%}.$$

6. Распределение частиц тяжелых минералов плотностью $\rho_3 = 17,0 \text{ т/м}^3$ и крупностью $d_3 = 0,1 \text{ мм}$ при попутной концентрации в придонном слое (баланс).

В составе пульпы поступает масса тяжелых частиц $M_3 = C_3 Q_{\text{т}} = 6960 \text{ мг/ч}$; выделяется в придонный слой 70 % твердого $T_{\text{н}} = Q_{\text{т}} \cdot 0,7 = 56 \text{ м}^3/\text{ч}$, концентрация полезного минерала в придонном слое $C_{\text{к}} = 124,6 \text{ мг/м}^3$.

Выводы. Таким образом, выделение нижней части потока дает возможность, не прерывая технологического процесса земснарядной разработки месторождения, оценить попутную концентрацию тяжелых минералов в зависимости от их плотности, крупности и скорости гидротранспортирования от 0–5 до 50 %.

Разработанная методика предназначена для прогнозирования возможности попутной концентрации полезных минералов на основе технологических параметров гидромеханизированной разработки месторождения без существенных дополнительных затрат.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Согин А. В., Согин И. А., Битюрин К. А. Гидромеханизация при намыве строительных площадок, грунтовых сооружений, пляжей. Нижний Новгород: ННГУ, 2013. 267 с.
2. Петропавловская В. Е., Новиченкова Т. Б., Белов В. В., Бурьяков А. Ф. Гранулометрический состав как критерий регулирования свойств дисперсных систем // Строительные материалы. 2013. С. 64–65.
3. Семененко Е. В., Никифорова Н. А., Татарко Л. Г. Расчет параметров гидротранспорта при существенном различии плотности транспортируемых частиц // Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Механіка». 2013. Т. 1. Вип. 17. С. 105–111.
4. Digitemie I. E., Ioppa A. V. Mini suction dredger for sand // The fourteenth International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Modern Techniques and Technologies" (МТТ'2008), Tomsk, Tomsk Polytechnic University. Tomsk: TPU Press, 2008. С. 56–58.

5. Ялтанец И. М. Справочник по гидромеханизации. М.: Горная книга, 2011. 736 с.
6. Глевицкий В. И. Гидромеханизация в транспортном строительстве: справ. пособие. М.: Недра, 1989. 271 с.
7. Бессонов Е. А. Технология и гидромеханизация гидромеханизированных работ: справ. пособие для инженеров и техников. М.: Центр, 1999. 544 с.
8. Журинов В. Д., Юфин А. П. Оборудование гидромеханизации. М.: Госстройиздат, 1960. 300 с.
9. Филиппов В. В. Технологические трубопроводы и трубопроводная арматура. СГТУ, Самара: 2007. 70 с.
10. Zvereva N. A., Valtsifer V. A. Internal structure of a powder during of its compacting // 14 International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA. Praha (Czech Republic). 2000. P. 63.
11. Пилов П. И. Гравитационная сепарация полезных ископаемых. Днепропетровск: НГУ, 2010. 127 с.
12. Валиев Н. Г. Расчет распределения частиц золота по крупности на откосе намываемого массива // Известия вузов. Горный журнал. 2002. № 6. С. 15–18.
13. Багазеев В. К., Валиев Н. Г. Гидромеханизация: разработка песчано-гравийных месторождений землесосными снарядами. Екатеринбург: УГГУ, 2006. 152 с.
14. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 560 с.
15. Кутишев А. В. Гранулометрический состав разреза сеноманских песчаных отложений Восточного участка месторождения «Центральное» Тамбовской области // Вестник ВГУ. Сер. Геология. 2013. № 2. С. 35–39.

Поступила в редакцию 2 июля 2019 года

Сведения об авторах:

Багазеев Виктор Константинович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного дела Уральского государственного горного университета. E-mail: viktor.bagazeev@m.ursmu.ru
Бойков Иван Сергеевич – старший преподаватель кафедры горного дела Уральского государственного горного университета. E-mail: i.boikov@bk.ru
Валиев Нияз Гадым Оглы – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой горного дела Уральского государственного горного университета. E-mail: niyaz.valiev@m.ursmu.ru
Здоровец Игорь Леонидович – главный инженер артели старателей «Нейва». E-mail: zdorovets.i@yandex.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-25-33

Heavy minerals secondary processing estimation at pulp hydrotransport in the pipeline

Viktor K. Bagazeev¹, Ivan S. Boikov¹, Niiaz G. Valiev¹, Igor L. Zdorovets²

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

² Neiva Gold Mining Cooperative, Neviansk, Sverdlovsk region, Russia.

Abstract

Introduction. When developing placers containing small amounts of heavy minerals, it is advisable to use the technology of hydraulic mining which includes secondary processing of these minerals essential for sand preliminary processing.

Research aim is to estimate heavy minerals secondary processing in pipeline bottom layer and single this layer out of the general flow at pulp hydrotransport when developing placers with dredgers.

Methodology. Based on the regularities analysis of pulp hydrotransport, sands granulometric distribution and the results of physical simulation of the process in laboratory conditions, the analytical substantiation of hard minerals secondary processing parameters is carried out. The main provisions of secondary concentration are as follows: at sand hydrotransport, bottom layer of large and heavy particles arises in the pipeline, the particles drag or roll over. At that, particles distribution by size and density in the cross section of pulp flow corresponds to Rozin-Rammeler equation.

Results. The results are presented of the laboratory research of weighing heavy particles from the bottom sediment, measuring weighing speed for heavy minerals and quartz sand. The obtained results were approximated by the formula. The example is given of heavy minerals secondary processing possibility analytical estimation.

Summary. The use of the secondary processing without change of a field development process flow diagram will significantly improve the efficiency of the subsequent processing processes when developing placer deposits.

Key words: dredger; hydrotransport; sedimentation; secondary processing of heavy minerals.

REFERENCES

1. Sogin A. V., Sogin I. A., Bitiurin K. A. *Hydraulic mining at the inwash of construction sites, soil structures, and beaches*. Nizhny Novgorod: NNSU Publishing; 2013. (In Russ.)
2. Petropavlovskaya V. E., Novichenkova T. B., Belov V. V., Buriakov A. F. Granulometric composition as a criterion of dispersed systems properties regulation. *Stroitelnye materialy = Constructional Materials*; 2013; 64–65. (In Russ.)
3. Semenenko E. V., Nikiforova N. A., Tatarko L. G. Hydrotransport parameters calculation at significant difference of the transported particles density. *Visnik Dnipropetrovskogo universitetu. Seriya Mekhanika = Herald of Dnepropetrovsk National University. Mechanics*. 2013; 1 (17): 105–111. (In Russ.)
4. Digitemie I. E., Ioppa A. V. Mini suction dredger for sand. In: *The fourteenth International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Modern Techniques and Technologies" (MTT'2008), Tomsk, Tomsk Polytechnic University*. Tomsk: TPU Press Publishing; 2008. p. 56–58.
5. Ialtanets I. M. *Hydraulic mining reference*. Moscow: Gornaia kniga Publishing; 2011. (In Russ.)
6. Glevitskii V. I. *Hydraulic mining at transport construction: handbook*. Moscow: Nedra Publishing; 1989. (In Russ.)
7. Bessonov E. A. *Technology and hydraulic mining technology at hydromechanized operations*. Moscow: Tsentr Publishing; 1999. (In Russ.)
8. Filippov V. V. *Process pipelines and pipeline fittings*. Samara: SSTU Publishing; 2007. (In Russ.)
9. Zhurin V. D., Iufin A. P. *Equipment for hydraulic mining*. Moscow: Gosstroizdat Publishing; 1960. (In Russ.)
10. Zvereva N. A., Valtsifer V. A. Internal structure of a powder during of its compacting. In: *14 International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA. Praha (Czech Republic)*; 2000. P. 63.
11. Pilov P. I. *Mineral gravity separation*. Dnepropetrovsk: NSU Publishing; 2010. (In Russ.)
12. Valiev N. G. Calculation of gold particles distribution by size at the slope of the inwash mass. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2002; 6: 15–18. (In Russ.)
13. Bagazeev V. K., Valiev N. G. *Hydraulic mining: developing sand and gravel deposits by dredgers*. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2006. (In Russ.)
14. Idelchik I. E. *Hydraulic resistance reference*. Moscow: Mashinostroenie Publishing; 1992. (In Russ.)
15. Kutishchev A. V. Particle size structure of the cretaceous sand sediment section of the eastern section of Central deposit of Tambov region. *Vestnik VGU. Ser. Geologiya = Proceedings of VSU. Geology*. 2013; 2: 35–39. (In Russ.)

Received 2 July 2019

Information about authors:

Viktor K. Bagazeev – DSc (Engineering), Professor, professor of Mining Department, Ural State Mining University. E-mail: viktor.bagazeev@m.ursmu.ru

Ivan S. Boikov – senior lecturer, Mining Department, Ural State Mining University. E-mail: i.boikov@bk.ru

Niyaz G. Valiev – DSc (Engineering), Professor, Head of Mining Department, Ural State Mining University. E-mail: niyaz.valiev@m.ursmu.ru

Igor L. Zdorovets – engineering manager, Neiva Gold Mining Cooperative. E-mail: zdorovets.i@yandex.ru

Для цитирования: Багазеев В. К., Бойков И. С., Валиев Н. Г., Здоровец И. Л. Оценка попутной концентрации тяжелых минералов при гидротранспорте пульпы в трубопроводе // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 7. С. 25–33. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-25-33

For citation: Bagazeev V. K., Boikov I. S., Valiev N. G., Zdorovets I. L. Heavy minerals secondary processing estimation at pulp hydrotransport in the pipeline. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 7: 25–33 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-25-33