УДК 622.755:622.362.3 DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-21-29

Разделение песков в процессе их гидротранспортирования

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. *Для непрерывного разделения твердых частиц песка по крупности и плотности в технологической цепи разработки россыпных месторождений землесосными снарядами целесообразно использование цилиндрических гидроциклонов в условиях земснарядной разработки месторождения.*

Цель работы. *Определение технологических параметров попутного разделения мелких и легких частиц и тяжелых минералов в цилиндрических гидроциклонах при разработке россыпных месторождений землесосными снарядами.*

Методология. *В работе решаются задачи определения пропускной способности, конструктивных размеров и расчета показателей разделения твердых частиц в цилиндрических гидроциклонах с плоским дном на основе теоретических положений цилиндроконических гидроциклонов и экспериментов в лабораторных условиях.*

Результаты. *Выбраны наиболее приемлемые аналитические зависимости и формулы для ориентировочного определения параметров: пропускной способности (производительности) по формуле Модера и Дальстрома; перепадов давления с учетом чисел Рейнольдса и Эйлера; крупности граничного зерна по развернутой формуле А. И. Поварова. Смонтирована лабораторная установка цилиндрического гидроциклона с плоским дном с характеристиками, как и у цилиндроконических гидроциклонов. Показана достаточная сходимость расчетных параметров с показателями, измеренными на лабораторной установке гидроциклона с плоским дном, при эффективности разделения 54 %.*

Выводы. *Использование попутного разделения минералов в цилиндрических гидроциклонах существенно повысит эффективность их последующего обогащения.*

Ключевые слова: *земснаряд; цилиндрический гидроциклон; производительность; перепад давления; граничное зерно.*

Введение. При разработке россыпных месторождений перед операциями первичного обогащения имеет место попутное разделение твердых частиц в технологических операциях. Это особенно важно при низком содержании полезных минералов в техногенных и мелкозернистых песках. Попутное разделение возможно при гидротранспорте песков в цилиндрических гидроциклонах, обладающих большой пропускной способностью.

Центробежные силы, возникающие в гидроциклоне, способствуют эффективному разделению твердых частиц по крупности и плотности, что повышает показатели последующего обогащения. Достоинства таких гидроциклонов – простота конструкции и возможность непрерывного разделения частиц без разрыва технологической цепи разработки месторождения.

Механизм и динамика сепарации частиц в гидроциклонах освещены в специальной и учебной литературе [1–4, 5]. В промышленности широко распространены цилиндроконические гидроциклоны, которые в зависимости от угла конусности α используются для обесшламливания и сгущения гидросмеси (при $\alpha = 10°$), для гидравлической классификации ($\alpha = 20°$), для обогащения в тяжелых средах ($\alpha = 40°–60°$), для сепарации по плотности (при $\alpha > 60°$) [4].

Разделение по плотности происходит и в плоскодонных цилиндрических гидроциклонах, при этом технологические показатели разделения приблизительно соответствуют показателям конических [1].

Цель работы – определение технологических параметров попутного разделения мелких и легких частиц и тяжелых минералов в цилиндрических гидроциклонах с плоским дном в условиях земснарядной разработки россыпных месторождений.

Методология. В работе решаются задачи определения пропускной способности, конструктивных параметров, расчета показателей разделения в цилиндрических гидроциклонах на основе общих теоретических положений расчета и сопоставления их с результатами экспериментов в лабораторных условиях.

Особенностью объектов исследования является большая производительность по пескам и гидросмеси, недостаточная изученность гидроциклонов с плоским дном и их размещения в непрерывной технологической цепи земснарядной добычи песков.

Изложение материалов исследования. В конструктивном отношении у цилиндроконических гидроциклонов принимаются следующие соотношения геометрических размеров [1, 2, 4]:

$$d_{\text{вх}}/D = 0,30 - 0,17; \qquad d_{\text{в}}/D = 0,30 - 0,16; \qquad d_{\text{н}}/D = 0,10 - 0,25;$$
$$L = (4,8 - 5,2)D,$$

где D – внутренний диаметр цилиндрической части, м; L – длина (высота) гидроциклона, м; $d_{\text{вх}}$, $d_{\text{в}}$, $d_{\text{н}}$ – диаметры входного, верхнего, нижнего патрубков, м.

Технологический расчет гидроциклона включает определение расходных характеристик, гидравлический расчет перепада давления на входе и выходе гидроциклона, прогноз разделения твердых частиц по граничной крупности.

Под крупностью граничного зерна δ понимается размер таких частиц, которые распределяются поровну между продуктами разделения в верхнем и нижнем патрубках. Считается, что частицы размером больше δ выделяются в основном в нижний продукт, а меньше δ – в верхний продукт.

Приближенное теоретическое определение расхода воды через гидроциклон $Q_{\text{с}}$, м^3/с, на основе уравнения Д. Бернулли, с учетом параметров гидроциклона таково [5]:

$$Q_{\text{с}} = \mu \frac{\pi}{4} \frac{d_{\text{вх}}^{1,2}}{D^{0,6}} \left(d_{\text{в}}^2 + d_{\text{н}}^2\right)^{0,7} \sqrt{2gH}, \tag{1}$$

где μ – коэффициент расхода, μ = 0,5–0,7; H – напор воды на входе в гидроциклон, м; D – внутренний диаметр цилиндрической части, м; $d_{\text{вх}}$, $d_{\text{в}}$, $d_{\text{н}}$ – диаметры входного, верхнего, нижнего патрубков, м; g – ускорение свободного падения, м/с^2. На практике для расчета пропускной способности (производительности) цилиндроконических гидроциклонов разработано большое количество эмпирических формул.

Для цилиндрического плоскодонного гидроциклона более соответствующей (без указания конусности) будет экспериментальная формула Модера и Дальстрома [2, 6]:

$$Q_{\text{ч}} = 10^{-2} k \left(d_{\text{вх}}^1 \quad d_{\text{в}}^1\right)^{0,9} \sqrt{\Delta P},$$

или

$$Q_{ч} = k\left(d^1_{вх} d^1_{в}\right)^{0,9}\sqrt{H}, \tag{2}$$

где $Q_{ч}$ – пропускная способность, м^3/ч; $d^1_{вх}$, $d^1_{в}$ – диаметры входного, верхнего патрубков, см; ΔP – перепад давления, Па; k – коэффициент, учитывающий объемную концентрацию твердого в гидросмеси, k = 0,4–0,6 при $d^1_{вх}$, $d^1_{в}$ = 0,75–2,1.

Перепад давления ΔP характеризует потери энергии потока (потери напора ΔH) на преодоление гидравлических сопротивлений в гидроциклоне. В зависимости от режима движения потока гидросмеси [1] вдоль оси гидроциклона образуется воздушный столб за счет подсасывания воздуха при выгрузке выходящих потоков в атмосферу [7].

Для гидроциклонов без воздушного столба [1]

$$\Delta P = E_{И}\rho U^2_{вх}, \tag{3}$$

с воздушным столбом

$$\Delta P = 0,5E_{И}\rho U^2_{вх}, \tag{4}$$

где $E_{И}$ – безразмерный параметр (критерий) Эйлера; ρ – плотность гидросмеси, кг/м^3; $U_{вх}$ – скорость потока в питающем патрубке, м/с; ΔP – перепад давления, Па.

Критерий Эйлера для гидроциклона [1]

$$E_{И} = 1 + 3,5Ae\left(\frac{Q_{в}}{Q_{вх}}\right)^{0,8}, \tag{5}$$

где $Q_{в}$, $Q_{вх}$ – расход гидросмеси через питающий и верхний патрубок, м^3/ч; e – коэффициент, учитывающий шероховатость стенок гидроциклона; A – безразмерный параметр, зависящий от критерия Рейнольдса Re, в [1] имеется графическая зависимость, которая аппроксимирована формулой

$$A = 1,43\lg \mathrm{Re} - 5,2 \tag{6}$$

где

$$\mathrm{Re} = \frac{d_{вх}U_{вх}\rho}{\mu_{ж}}, \tag{7}$$

где $\mu_{ж}$ – динамический коэффициент вязкости, Па · с.

Номинальная крупность граничного зерна δ, мкм, по формуле Модера [2]

$$\delta = \frac{13,8\left(d_{вх}d_{в}\right)^{0,68}}{\sqrt{\left(\rho_{т} - \rho_{о}\right)\left[Q_{с}/F_{вх}\right]^{0,53}}}, \tag{8}$$

где $d_{вх}$, $d_{в}$ – диаметры входного, верхнего патрубков, см; $Q_{с}$ – расход воды через гидроциклон, см^3/с; $F_{вх}$ – площадь поперечного сечения входного патрубка, см^2; $\rho_{т}$, $\rho_{о}$ – плотности твердых частиц и жидкости, г/см^3.

Более развернутая формула граничной крупности А. И. Поварова [1, 6]:

$$\delta = 0{,}182D\sqrt{\frac{d_{н}\mu_{ж}}{K_D K_\alpha H_{ц}\alpha^{0,3}\left(\rho_{т}-\rho\right)\sqrt{P}}}, \qquad (9)$$

где D, $d_{н}$, $d_{в}$ – внутренний диаметр цилиндрической части, диаметры нижнего, верхнего патрубков, см; $H_{ц}$ – высота гидроциклона, см; δ – диаметр граничного зерна, см; $\rho_{т}$, ρ – плотности твердых частиц и гидросмеси, г/см^3; $\mu_{ж}$ – динамический коэффициент вязкости, пуаз; поправочные коэффициенты на диаметр

$$K_D = 0{,}8 + \frac{1{,}2}{1+0{,}1D}$$

и угол конусности

$$K_\alpha = 0{,}79 + \frac{0{,}044}{0{,}0379\mathrm{tg}(\alpha/2)},$$

где α – угол конусности, рад.

Выход твердых частиц в сливе приблизительно равен суммарному выходу класса по минусу крупности $\delta_{н}$ в исходной гидросмеси, а выход песковой фракции – по плюсу.

Таким образом, по формулам (2)–(9) возможно определение основных технологических параметров ориентировочно цилиндрических гидроциклонов с плоским дном.

Исследование параметров гидроциклона с плоским дном проводилось на лабораторной установке (рис. 1, табл. 1).

Таблица 1. Размеры лабораторной установки
Table 1. Dimensions of the laboratory facility

Параметр, ед. изм.	**Значение**
Длина (высота) цилиндра L, см	34,0
Угол наклона цилиндра τ, град.	10; 60; 90
Диаметр цилиндра D, см	5,0
Диаметр входного патрубка $d_{вх}$, см	1,5
Диаметр верхнего патрубка $d_{в}$, см	1,5
Диаметр нижнего патрубка $d_{н}$, см	1,0; 0,6
Диаметр насадки гидроэлеватора $d_{нас}$, см	0,6
Манометрический напор P, кг/см^2	0,2; 1; 1,5
Эквивалентный диаметр $d_{экв}$ при $d_{н}$ = 0,6 см ($d_{н}$ = 1,0 см)	1,43; 1,64
Эффективный диаметр $d_{эф}$ при $d_{н}$ = 0,6 см ($d_{н}$ = 1,0 см)	0,47; 0,41

В ходе испытаний измерялись: угол наклона цилиндра к горизонту τ (град); манометрическое давление воды P (кгс/см^2); время подачи t (с); объем верхнего продукта $V_{в}$ (л), нижнего продукта $V_{н}$ (л), рассчитывались: общий расход подачи $q_{о}$ (л/с); расход верхнего продукта $q_{в}$ (л/с); расход нижнего продукта $q_{н}$ (л/с), опыты повторялись от 3 до 6 раз, средние значения приводятся в табл. 2.

Сопоставим расчетные и измеренные показатели с учетом величины начального давления P, скорости потока во входном патрубке $U_{вх}$ и значений коэффициентов μ и K.

1. Пропускная способность по формуле (1):

Опыт 17В: P = 0,95 кгс/см^2 (H = 9,5 м вод. ст.); $U_{вх}$ = 4,98 м/с; $q_о$ = 0,88 л/с = = 0,00088 м^3/с. Расчет: μ = 0,575. Расчетные значения $Q_с$ соответствуют измеренным: $Q_с = q_о$ = 0,00088 м^3/с.

Опыт 15: P = 0,15 кгс/см^2 (H = 1,5 м); $U_{вх}$ = 0,781 м/с; $q_о$ = 0,00013 м^3/с. Расчет: $Q_с$ = μ · 0,000543 м^3/с. Расчетные значения соответствуют измеренным: $Q_с = q_о$ при μ = 0,024.

2. Пропускная способность по формуле (2):

Опыт 17В: $q_о$ = 0,88 л/с = 3,168 м^3/ч; расчет K = 0,482. Расчетные значения соответствуют измеренным при K = 0,482; $Q_ч = q_о$ = 3,168 м^3/ч.

Опыт 15: $q_о$ = 0,13 л/с = 0,468 м^3/ч. Расчетные значения соответствуют измеренным при K = 0,18; $Q_ч = q_о$ = 0,468 м^3/с.

3. Перепад давления по формулам (3), (4):

Опыт 17В: $d_в$ = 0,015 м ($q_{о.в}$ = 0,00039 м^3/с – расход через верхний патрубок); $H_в$ = 2,2 м; $d_н$ = 0,008 м; $q_{о.н}$ = 0,00041 м^3/с; $H_н$ = 7,27 м; P = 1000 кгс/м^2; $\mu_ж = 10^{-3}$ Па · с.

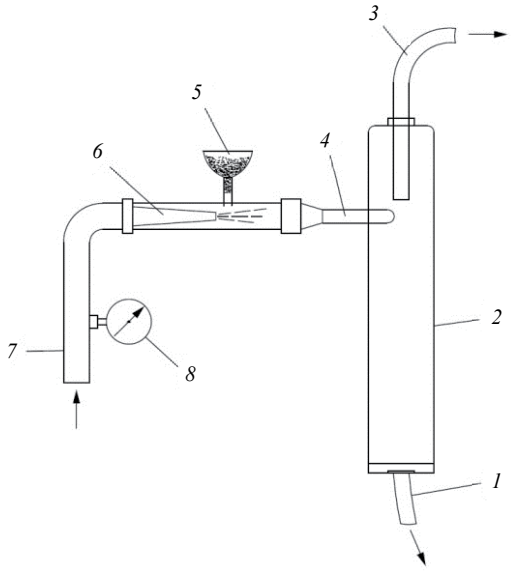

Рис. 1. Лабораторная установка цилиндрического гидроциклона:
1 – патрубок нижнего продукта; *2* – корпус из плексигласа; *3* – патрубок верхнего продукта; *4* – входной патрубок; *5* – воронка для сухой загрузки песка; *6* – насадка гидроэлеватора; *7* – патрубок подачи воды; *8* – манометр

Fig. 1. Laboratory installation of a cylindrical hydrocyclone:
1 – underflow pipe; *2* – body made of plexiglass; *3* – overflow pipe; *4* – inlet pipe; *5* – funnel for dry sand loading; *6* – jet gun nozzle; *7* – water supply pipe; *8* – manometer

При расчетах по формулам получены следующие значения:

$$\mathrm{Re} = 74\ 700; \qquad A = 1,77; \qquad E_И = 4,227; \qquad \Delta P = 104\ 830\ \text{Па}.$$

Все расчетные значения коэффициентов μ, φ, k, перепад давления ΔP находятся в пределах, приводимых в литературе [1–12], где φ = μ/e – коэффициент скорости; e – коэффициент сжатия струи, для круглых отверстий $e \approx 0,64$ [11].

Исходя из возможных условий сухой загрузки песчаной смеси гидроэлеватором для определения номинальной крупности граничного зерна получены следу-

ющие показатели (опыт 13, табл. 3, рис. 2): P = 0,22 кгс/см^2; $q_о$ = 0,146 л/с; объем воды $W_о$ = 42,77 л; масса песчаной смеси П = 143,2 г; выход продуктов разделения через верхний патрубок: объем воды $W_о$ = 36,4 л; масса песка $П_в$ = 50,9 г; через нижний патрубок: объем воды $W_о$ = 6,4 л, масса песка $П_н$ = 92,3 г.

Таблица 2. Расходные характеристики гидроциклона
Table 2. Flow characteristics of a hydrocyclone

Номер опыта	Угол τ, град	Подача воды				Верхний продукт (слив)		Нижний продукт (пески)	
		P, кгс/см^2	t, с	$V_в + V_н$	$q_о$, л/с	$V_в$, л	$q_в$, л/с	$V_н$, л	$q_н$, л/с
10	90	0,200	245	35,400	0,144	28,40	0,110	7,000	0,0280
12–14	60	0,200	281	37,320	0,132	33,85	0,128	3,470	0,0123
15	10	0,250	68	8,840	0,130	8,35	0,123	0,485	0,0710
16^в	90	0,200	15	1,265	0,084	0,87	0,058	0,375	0,0250
16^б	60	0,100	15	1,975	0,132	1,60	0,107	0,375	0,0250
16^а	10	0,150	15	1,920	0,138	1,62	0,108	0,300	0,0200
17^а	90	0,920	10	8,020	0,800	4,27	0,425	3,750	0,3700
17^б	60	0,975	10	8,080	0,800	4,22	0,420	3,860	0,3850
17^в	10	0,950	10	8,840	0,880	3,94	0,390	4,900	0,4100

По результатам измерений, приведенных в табл. 3, построен график для определения граничной крупности частиц – частиц, соответствующих 50-процентному извлечению в верхний и нижний патрубки, $\delta_{гр}$ = 0,12 мм. Расчетные значения по формулам составили: по формуле Мадера (8) $\delta_{гр}$ = 0,006 мм; по развернутой формуле А. И. Поварова (9) $\delta_{гр}$ = 0,12 мм.

Таким образом, наибольшее соответствие достигается по формуле (9).

Таблица 3. Показатели разделения песчаной смеси
Table 3. The indicators of sand mixture separation

Класс крупности, мм	Средняя крупность класса d, мм	Состав смеси, %			Извлечение	
		исходной	верхнего продукта (слив)	нижнего продукта (песков)	во фракцию верхнего продукта (в слив), $И_в$	во фракцию нижнего продукта (в пески), $И_н$
–2+1	1,5	7,4	–	11,3	–	100,0
–1+0,5	0,75	10,4	0,3	15,7	1,3	98,7
–0,5+0,25	0,375	27,3	3,9	36,9	5,1	94,9
–0,25+0,1	0,175	19,3	19,7	21,1	36,2	63,8
0,1	0,05	35,6	76,1	15,0	76,0	24,0

Эффективность классификации E (доли ед.) определяется как отношение приращения количества материала определенной крупности в верхнем патрубке (сливе) к приращению количества материала той же крупности в сливе в идеальном случае

$$E = \frac{(\alpha - \upsilon)(\beta - \alpha)}{\alpha(1 - \alpha)(\beta - \upsilon)},$$

где α, β, υ – содержание частиц расчетного класса в питании, сливе и песках, доли ед.

В опытных измерениях (табл. 3): $\alpha = 0{,}3$; $\beta = 0{,}77$; $\upsilon = 0{,}15$. Тогда $E = 0{,}54$, или 54 %.

Результаты исследований. Выбраны наиболее приемлемые аналитические зависимости и формулы для ориентировочного определения технологических параметров цилиндрических гидроциклонов с плоским дном: пропускной способности (формула (2)), перепада давления (формулы (3)–(7)), граничной крупности (формула (9)).

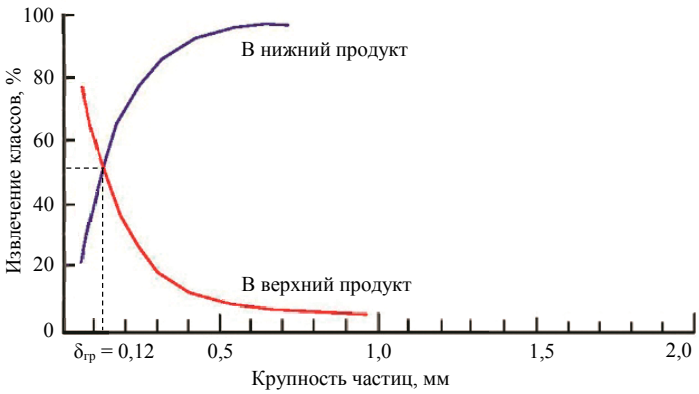

Рис. 2. График определения граничной крупности $\delta_{гр}$
Fig. 2. The boundary size δ_b chart

Смонтирована лабораторная установка цилиндрического гидроциклона с плоским дном с характеристиками, подобными цилиндроконическим гидроциклонам.

Показана достаточная сходимость расчетных параметров с измеренными на лабораторной установке гидроциклона с плоским дном с эффективностью разделения $E = 54$ %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Башаров М. М., Сергеева О. А. Устройство и расчет гидроциклонов / под ред. А. Г. Лаптева. Казань: Вестфалика, 2012. 92 с.

2. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. II. СПб: Мир и семья, 2006. 916 с.

3. Кармазин В. В., Торопов О. А. Теоретический анализ технологических возможностей гидроциклонов // ГИАБ. 2009. № S15. Отд. вып. С. 215–228.

4. Пилов П. И. Гравитационная сепарация полезных ископаемых. Днепропетровск: НГУ, 2010. 123 с.

5. Измайлова А. Н., Консетов В. В. Теоретическое определение расходных характеристик гидроциклонов // Гидродинамические и тепломассообменные процессы в химической аппаратуре. Ленниихиммаш. Труды. 1967. № 2. С. 5–40.

6. Поваров А. И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках. М.: Недра, 1978. 232 с.

7. Балахнин И. А. Исследование размеров воздушного столба в цилиндрическом гидроциклоне. Научное обозрение. Технические науки. 2014. № 1. С. 66.

8. Голубцов В. М., Олейник М. Л., Кравченко Д. Ю. К расчету производительности гидроциклона глиноземного производства Запорожского алюминиевого комбината // Металургія: наукові праці ЗДІА. 2009. Вип. 20. С. 147–153.

9. Moder J. A., Dahlstrom D. A. Fine-size, close-specific-gravity solid separation with the liquid-solid cyclone // Chem. Engng. Progr. 1952. Vol. 48. No. 2. P. 75–88.

10. Голубцов В. М. К расчету гидравлического сопротивления напорных гидроциклонов // Металургія: наукові праці ЗДІА. 2010. Вип. 22. С. 191–197.

11. Гусев А. А. Гидравлика. М.: Юрайт, 2013. 285 с.

12. Ялтанец И. М. Справочник по гидромеханизации. М.: Горная книга, 2011. 736 с.

Поступила в редакцию 28 октября 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: 10.21440/0536-1028-2019-8-21-29

Sand separation during hydrotransportation

Viktor K. Bagazeev[1], Ivan S. Boikov[1], Niiaz G. Valiev[1], Igor L. Zdorovets[2]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.
[2] Neiva Gold Mining Cooperative, Neviansk, Sverdlovsk region, Russia.

Abstract

Introduction. *For solid sand particles continuous separation by size and density in the proccessing chain of placer development with suction dredges, it is advisable to use cylindrical hydrocyclones when dredging a deposit.*
Research aim *is to determine process parameters of small and light particles and heavy minerals secondary separation in cylindrical hydrocyclones when developing placers with dredgers.*
Methodology. *The paper deals with the problems of throughput and structural dimensions determination and solid particles separation in flat bottom cylindrical hydrocyclones calculation based on the theoretical positions of cylindrical-conical hydrocyclones and laboratory experiments.*
Results. *The most acceptable analytical dependencies and formulae were selected for the approximate determination of the parameters: throughput (productivity) according to the formula of Modera and Dalstrom; pressure drops with Reynolds and Euler numbers; boundary grain size according to the detailed formula of A. I. Povarov. A laboratory installation of a flat bottom cylindrical hydrocyclone was mounted with characteristics similar to cylindrical hydrocyclones. A sufficient convergence of the calculated parameters with the indicators measured at the laboratory installation of a flat-bottom hydrocyclone is shown with a separation efficiency of 54%.*
Conclusions. *The use of the secondary separation of minerals in cylindrical hydrocyclones will significantly increase the efficiency of their further dressing.*

Key words: *dredger; cylindrical hydrocyclone; performance; pressure drop; boundary grain.*

REFERENCES

1. Basharov M. M., Sergeeva O. A. *Structure and design of hydrocyclones*. Kazan: Vestfalika Publiching; 2012. (In Russ.)
2. *New reference for a chemist and a production engineer. Processes and devices of chemical technologies. Part 2*. St. Petersburg: Mir i semia Publishing; 2006. (In Russ.)
3. Karmazin V. V., Toropov O. A. Theoretical analysis of hydrocyclones process capabilities. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2009; S15 Special edition: 215–228. (In Russ.)
4. Pilov P. I. *Mineral gravity separation*. Dnepropetrovsk: NSU Publishing; 2010. (In Russ.)
5. Izmailova A. N., Konsetov V. V. Theoretical determination of hydrocyclones flow characteristics. In: *Hydrodynamic and heat-mass-exchange processes in chemical equipment. Lenniikhimmash. Proceedings*. 1967; 2: 5–40. (In Russ.)
6. Povarov A. I. *Hydrocyclones at dressing mills*. Moscow: Nedra Publishing; 1978. (In Russ.)
7. Balakhnin I. A. *Studying the size of the air column in a cylindrical hydrocyclone. Scientific Review. Engineering*. 2014; 1: 66. (In Russ.)
8. Golubtsov V. M., Oleinik M. L., Kravchenko D. Iu. On the productivity callculation of a alumina industry hydrocyclone at Zaporizhia aluminium smelter. *Metalurgiia: naukovi pratsi ZDIA*. 2009: 20: 147–153. (In Russ.)
9. Moder J. A., Dahlstrom D. A. Fine-size, close-specific-gravity solid separation with the liquid-solid cyclone. *Chem. Engng. Progr*. 1952; 48 (2): 75–88.
10. Golubtsov V. M. To the calculation of hydraulic resistance of pressure hydrocyclones. *Metalurgiia: naukovi pratsi ZDIA*. 2010; 22: 191–197. (In Russ.)
11. Gusev A. A. *Hydraulic engineering*. Moscow: Iurait Publishing; 2013. (In Russ.)
12. Ialtanets I. M. *Hydraulic mining reference*. Moscow: Gornaia kniga Publishing; 2011. (In Russ.)

Received 28 October 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
Niiaz 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. Разделение песков в процессе их гидротранспортирования // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 8. С. 21–29. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-21-29
For citation: Bagazeev V. K., Boikov I. S., Valiev N. G., Zdorovets I. L. Sand separation during hydrotransportation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 8: 21–29 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-21-29