



УДК 681.518.43

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННО-ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ МЕЛКИХ ЧАСТИЦ ГРАВИТАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Кускова Я.В.

Санкт-Петербургский горный университет

Аннотация.

Анализ состояния технологий обогащения, применяемых для разделения тонких фракций руд и материалов, показывает, что существуют проблемы получения кондиционной продукции из такого сырья с достижением приемлемого извлечения, обеспечивающего эффективность используемых технологий. Трудности в разделении минералов при их низкой крупности не позволяют эффективно переработать многочисленные запасы материалов различных месторождений гравитационным методом. Возможности многих традиционных методов обогащения при использовании их для разделения тонкодисперсных фракций исчерпаны. Необходимо в большей степени сосредоточить усилия ученых и специалистов-производственников на практическом решении основных технологических вариантов в новых научных направлениях с разработкой и внедрением новых конструкций аппаратов.

Нераскрытые возможности остаются при использовании разделения мелких и тонких классов минеральных смесей на основе использования центробежных полей. Возникает необходимость продолжения исследования закономерностей этого процесса и практического решения его аппаратного оформления.

Необходимо развитие теоретических основ процесса разделения мелких частиц на круглых концентрационных столах путем исследования зависимости эффективности разделения материалов от технологически значимых факторов конструкций гравитационно-центробежных аппаратов.

Информация о статье

Принята 15 октября 2018 г.

Ключевые слова: концентрационный стол, гравитационный метод обогащения, сегрегация частиц, тонкие фракции, центробежное поле.

USE OF GRAVITATIONAL-CENTRIFUGAL FIELDS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF SMALL PARTICLES' SEPARATION BY THE GRAVITY METHOD

Yana Kuskova

St. Petersburg Mining University

Abstract.

Analysis of the state of the enrichment technologies used to separate the fine fractions of ores and materials shows that there are problems in obtaining conditioned products from such raw materials with the achievement of acceptable recovery, ensuring the effectiveness of the technologies used. Difficulties in the separation of minerals with their low size do not allow efficient processing of numerous stocks of materials from various deposits by the gravity method. The possibilities of many traditional methods of enrichment when using them for the separation of fine fractions have been exhausted. It is necessary to concentrate more the efforts of scientists and production specialists on the practical solution of basic technological options in new scientific fields with the development and introduction of new apparatus designs.

Article info

Received October 15, 2018

Keywords: concentration table, gravity concentration method, particle segregation, fine fractions, centrifugal field.



Unsolved opportunities remain when using the separation of small and thin classes of mineral mixtures based on the use of centrifugal fields. There is a need to continue the study of the laws of this process and practical solutions to its hardware design.

It is necessary to develop the theoretical foundations of the process of separating small particles on round concentration tables by studying the dependence of the efficiency of separating materials on technologically significant factors of the designs of gravity centrifugal devices.

Введение. Теоретические основы разработки гравитационно-центробежного концентрационного стола нового типа

Процесс разделения минералов по плотностям происходит на поверхности деки под действием сил поперечного потока воды по наклонной деке и сил, вызываемых возвратно-поступательными движениями деки стола, действующими перпендикулярно движению потока пульпы и смывной воды. Поэтому каждая минеральная частица в зависимости от ее удельного веса и крупности обладает определенной скоростью передвижения V в струе воды, текущей по наклонной плоскости деки. С другой стороны, этой же частице сообщается скорость C от асимметричных возвратно-поступательных движений деки стола, направленная перпендикулярно направлению движения скорости V .

Под воздействием вышеуказанных сил материал, поступивший на деку стола, расслаивается и одновременно транспортируется в различных направлениях в зависимости от удельного веса, крупности и формы минеральных зерен.

Обобщение теоретических обоснований процесса обогащения на концентрационных столах было сделано П.В. Лященко [3], А.Ф. Таггартом [4, 5], А.М. Годэном [6].

Процесс расслаивания по удельным весам и крупности впервые был экспериментально изучен на деревянных и металлических шариках различной величины Ф.С. Дайером [7] еще в 1920-х гг. Он подвергал шарики сотрясательным движениям в стеклянном сосуде. В результате вибраций и встряхиваний нижний слой оказался состоящим из мелких металлических шариков, а выше над ними расположились крупные металлические, над ними и в промежутках между ними – мелкие деревянные шарики, а выше их – крупные деревянные шарики. В той же работе Ф.С. Дайер указывал на эффективность расслоения материала различной крупности в зависимости от горизонтальной агитации или разрыхления.

Подобное явление имеет место и на сотрясательных столах, что подтверждается распределением зерен по удельному весу и крупности, получаемому в результате расхождения веером по столу – рисунок 1 [3].

Рудная пульпа, поступившая на концентрационный стол, расслаивается по удельному весу, крупности и форме зерен. Более легкие, крупные и продолговатые зерна располагаются в верхних слоях, а более тяжелые и мелкие минеральные зерна занимают нижний слой. Такое расслоение обуславливается не только разностью удельных весов, но и равенством диаметров зерен.

Указанное распределение подтверждено практикой работы промышленных концентрационных столов и последующими исследованиями [8, 14, 15]. Оно показывает, что основой процесса разделения на столах является сегрегация в межрифловом пространстве, благодаря которой легкие и крупные частицы вытесняются в верхние слои потока и сносятся водой в поперечном направлении, а тяжелые мелкие опускаются на дно и транспортируются в продольном направлении.

Таким образом, общие принципы процесса обогащения на концентрационных столах могут быть коротко сформулированы следующим образом: сегрегация в межрифловом пространстве, транспортировка частиц в продольном (под влиянием колебаний деки) и поперечном (водой по уклону) направлениях [2].

Материалы и методы.

Разрыхление поступающего на деку материала создается в основном под действием направленного вибрационного ускорения этой деки и вертикальной составляющей турбулент-



ных вихрей воды, стекающей по наклонной плоскости [9]. Наибольшую разрыхленность имеют придонный и верхний слои, наименьшую - средний.

Придонный слой непосредственно контактирует с источником вынужденных колебаний – декой. Так как колебания в вышележащие слои взвеси передаются от частицы к частице, то они при переходе к средним слоям существенно затухают. Верхний же слой частиц дополнительно разрыхляется турбулентными пульсациями потока, а также волнами на поверхности раздела пульпа-воздух.

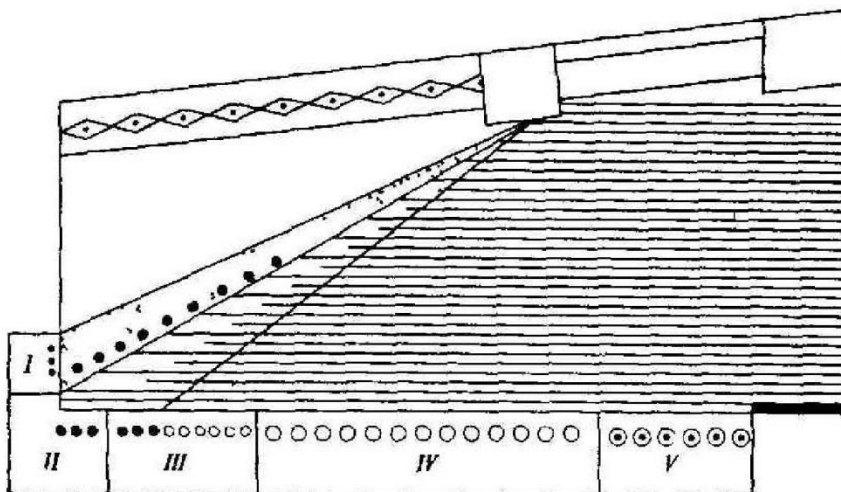


Рис.1. Схема распределения частиц по продуктам разделения: зона I - преимущественно мелкие частицы большой плотности - (концентрат 1); II - преимущественно крупные частицы большой плотности - (концентрат 2); III - мелкие частицы малой плотности и крупные частицы большой плотности (промпродукт); IV - крупные частицы малой плотности (хвосты); V - шламы

Коэффициент разрыхления m отдельных слоев в межрифельном пространстве рассчитан Б.В. Кизельватером [1] по экспериментальным данным Х. Кирхберга и Б. Бергера:

$$m = m_0 + (1 - m_0) \frac{\Delta h - \Delta h_0}{\Delta h}, \quad (1)$$

где Δh – толщина слоя частиц в разрыхленном состоянии; Δh_0 – толщина рассматриваемого слоя в сплоченном состоянии; m_0 – коэффициент разрыхления в сплоченном состоянии, в расчетах принят 0,45.

Коэффициент разрыхления придонного слоя составляет 0,625-0,650, средних слоев - 0,525-0,560, верхних – 0,540-0,600. Частота возмущений, передаваемых колеблющейся декой на жидкость в межрифельном пространстве, по данным Н.Н. Виноградова, на порядок больше частоты колебаний, возникающих от движения воды.

Разрыхление частиц пропорционально вибрационному ускорению деки, но при одном и том же ускорении оно выше для больших значений амплитуды. Более интенсивный режим разрыхления частиц с подбрасыванием имеет место тогда, когда вертикальная составляющая вибрационного ускорения деки больше гравитационного, т.е.

$$\frac{A \omega^2 \sin(\alpha + \beta)}{g \cos \alpha} > 1, \quad (2)$$

где A – амплитуда вибраций; $\omega = 2\pi n$ – угловая скорость; n – частота вращения; α – продольный угол наклона деки; β – угол вибрации; g – гравитационное ускорение.

Увеличение вибрационного ускорения деки (в диапазоне принятых на практике параметров колебаний концентрационных столов) приводит одновременно к резкому снижению псевдовязкости взвеси, что ускоряет процесс относительного перемещения частиц. Вместе с тем



возрастают и флуктуации частиц, нарушающие их закономерные движения. Таким образом, оптимизация вибрационного ускорения деки имеет важное технологическое значение.

Расслаивание (движение частиц в вертикальной плоскости) на концентрационном столе имеет в значительной мере характер сегрегации [1, 8]. В нижних слоях концентрируются тонкие частицы большей плотности, над ними - более крупные той же плотности в смеси с мелкими частицами меньшей плотности, еще выше - последовательно мелкие и крупные частицы малой плотности (рисунок 2). Самые тонкие частицы (менее 0,030-0,010 мм) находятся во взвешенном состоянии и движутся вместе с потоком воды.

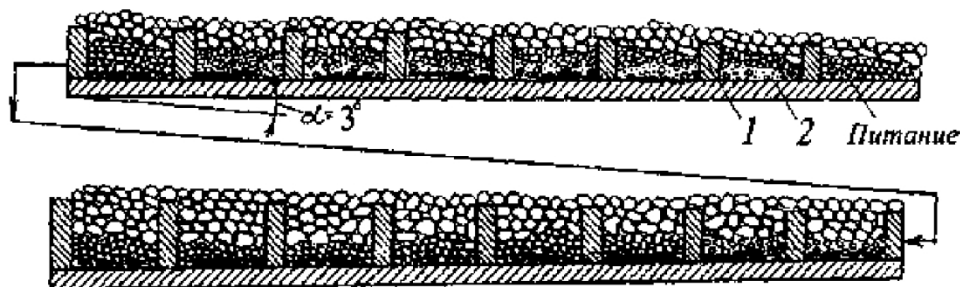


Рис. 2. Расслоение частиц легкой и тяжелой фракций между рифлями: 1 – дека стола; 2 – рифли

Скорость прохождения частиц через слой при прочих равных условиях повышается с увеличением плотности и уменьшением крупности проходящих частиц, с увеличением крупности частиц слоя, при увеличении коэффициента разрыхления слоя.

Специфика колебаний деки и турбулентных вихрей в межрифельном пространстве деки несколько изменяет соотношение крупности и плотности частиц в элементарных слоях взвеси, однако качественно сегрегация частиц на основе вибрационного их разрыхления имеет общие закономерности [10].

Транспортирование частиц в продольном и поперечном направлениях

Скорость продольного перемещения частиц в межрифельном пространстве зависит от закона движения деки, абсолютного значения ее ускорения, соотношения амплитуды и частоты колебаний, размера и плотности частиц, коэффициента трения (минерал - поверхность деки), сопротивления среды, продольного угла наклона деки [9].

Концентрационные столы оснащены приводом с бигармоническими колебаниями, обеспечивающими при прочих равных условиях большую скорость продвижения частиц. При этом уравнения движения деки по Б.В. Кизельватеру имеют вид:

$$S = \frac{L}{2} \left\{ 1 - \cos \omega t - \frac{\lambda}{4} [1 - \cos(2\omega t + \varepsilon)] \right\};$$

$$v = \frac{L\omega}{2} \left[\sin \omega t - \frac{\lambda}{2} \sin(2\omega t + \varepsilon) \right];$$

$$W = \frac{L\omega^2}{2} [\cos \omega t - \lambda \cos(2\omega t + \varepsilon)],$$
(3-5)

где S , v , W - соответственно перемещение, скорость и ускорение деки; L - размах колебаний (ход) деки; t - время от начала движения деки; λ - отношение амплитуды второй гармоники к первой; ε - сдвиг фаз между гармониками.

Обычно $\lambda = 0,5$, $\varepsilon = 0$. При этом максимальное ускорение деки во время обратного хода в 2 раза больше ускорения прямого хода.

По графикам относительных скорости и ускорения движения деки (рисунок 3) в соответствии с уравнениями (4) и (5) перемещение частицы вдоль деки начинается в момент $\varphi = \varphi_0$ (точка А), когда скорость деки резко уменьшается, а частица по инерции, преодолевая силу трения, скользит по поверхности вперед. В точке N скорости частицы и деки выравниваются, после чего частица может перемещаться вместе с декой или из-за быстрого увеличения скорости деки отставать от нее (обратное скольжение), как показано на рис. 3, а.

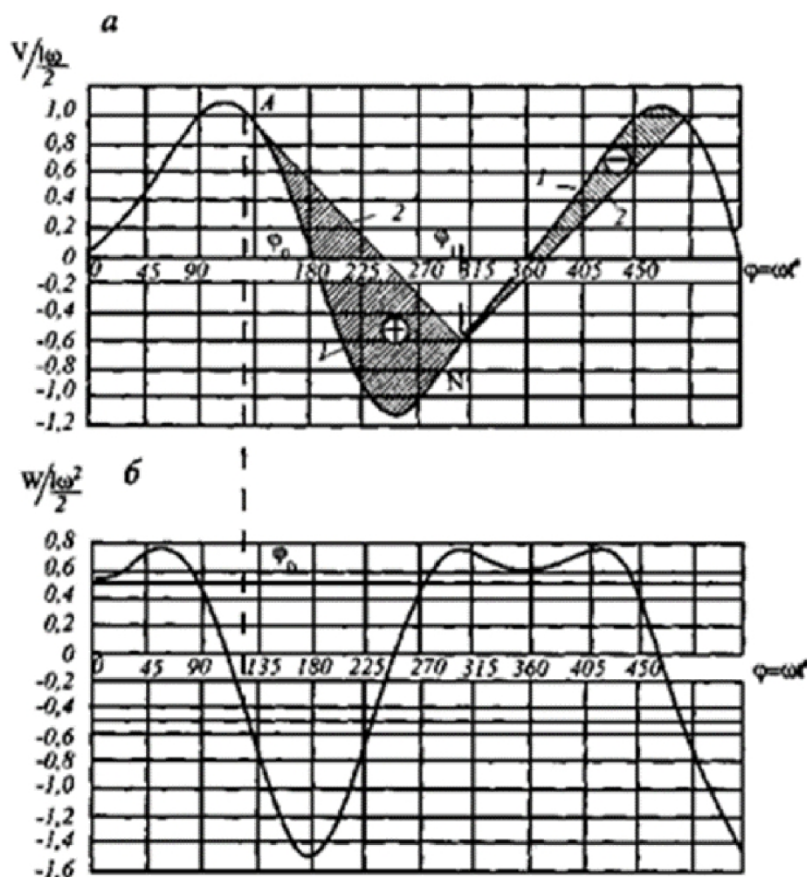


Рис. 3. Диаграммы относительных скоростей (а) и ускорений (б) при колебательных движениях плоскости по бигармоническому закону: 1 - скорость деки; 2 - скорость частицы [2]

Площади, обозначенные на рисунке знаками «плюс» и «минус», определяют величину пути движения частицы относительно деки вперед и назад. Средняя безразмерная скорость частиц

$$v_0 = \frac{1}{2\pi} (S_+ - S_-), \quad (6)$$

где S_+ и S_- , соответственно, сумма площадей, характеризующих движение частицы вперед и назад [1].

Достаточно надежное теоретическое описание перемещения частицы вдоль деки затруднено определением сопротивления среды, зависящего от параметров взвеси, гидродинамического режима, координаты этой частицы над поверхностью деки и т.д.

Дополнительное сопротивление, оказываемое жидкостью, существенно замедляет скорость транспортирования особенно мелких частиц в межрифельном пространстве столов. Смывная вода также замедляет их продольные перемещения.

Необходимое условие продольного перемещения частиц по деке стола

$$ma > Gof, \quad (7)$$

т.е. сила инерции частицы должна быть больше силы трения Gof , где f - коэффициент трения.

Скорость продольного перемещения частиц при обычных условиях работы концентрационного стола находится, по экспериментальным данным, в пределах 1-3 см/с. Для тяжелых зерен (касситерит, вольфрамит) скорость продольного перемещения составляет 2-4 см/с, для легких (кварцит) - 1,7-2 см/с.

Скорость транспортирования частиц зависит и от продольного угла наклона деки. Поэтому оптимизация скорости продольного движения частиц должна исходить из такого соотношения



параметров вибрации и угла наклона деки, при котором учитываются флуктуации частиц как функция вибрационного ускорения.

В поперечном направлении частицы транспортируются потоком смывной воды, текущей по наклонной плоскости. Несмотря на особенность рифленой поверхности стола, среднюю скорость потока пульпы в поперечном направлении в первом приближении целесообразно рассчитывать по формуле Шези в виде [3]:

$$v_{cp} = \left(\frac{1}{n} \sqrt{i} \right)^{0,6} (qb_{д})^{0,4}, \quad (8)$$

где v_{cp} – скорость потока, м/с; $i = \sin \alpha$ – уклон плоскости; q – средний удельный расход пульпы, $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{с})$; $b_{д}$ – ширина деки, м.

Скорость движения частиц в поперечном направлении повышается с увеличением расхода смывной воды и поперечного наклона деки. Для зерен большой плотности эта скорость составляет менее 1 см/с, а для частиц пустой породы - 1-1,5 см/с. В то же время поверхностные скорости потоков на деке стола составляют десятки сантиметров в секунду в зависимости от удельного расхода воды, глубины потока и высоты рифлей. Достаточно надежного количественного описания скорости поперечного транспортирования частиц на рифленой деке стола в настоящее время нет. Это связано с уже рассмотренными особенностями гидродинамического и вибрационного разрыхления различных по высоте слоев материала и сегрегации частиц в условиях сильной турбулизации потока при возвратно-поступательном движении деки. Другими словами, принципиальная особенность разрыхления и транспортирования в поперечном и продольном направлениях частиц даже одной гидравлической крупности осуществляется сочетанием сил различной природы: наиболее плотных и мелких (в придонных слоях) - преимущественно механических; менее плотных и крупных (в верхних слоях) - преимущественно гидродинамических. Ориентировочные соотношения размаха и частоты колебаний деки в зависимости от крупности исходного материала можно определить по эмпирическим формулам:

$$L = 18 \sqrt[4]{d_{max}}, \text{ мм}; \quad (9, 10)$$

$$n = 250 / \sqrt[5]{d_{max}}, \text{ 1/ мин.}$$

где L -длина хода, мм; d_{max} — максимальная крупность частиц, мм; n - число ходов в минуту.

Подсчитанные по этим формулам длина хода и частота колебаний деки в зависимости от крупности исходного материала (табл. 1) показывают необходимость увеличения ускорения с уменьшением крупности исходного материала [9].

Таблица 1. Длина и число ходов деки стола в зависимости от крупности обогащаемого материала (по И.Н.Исаеву)

| Максимальная крупность частиц, мм | Длина хода, мм | Число ходов, мин | Максимальная крупность частиц, мм | Длина хода, мм | Число ходов, мин |
|-----------------------------------|----------------|------------------|-----------------------------------|----------------|------------------|
| 3,0 | 24 | 200 | 0,8 | 17 | 262 |
| 2,5 | 23 | 208 | 0,6 | 16 | 277 |
| 2,36 | 22 | 210 | 0,5 | 15 | 287 |
| 2,15 | 22 | 215 | 0,4 | 14 | 300 |
| 2,0 | 21,5 | 217 | 0,3 | 13 | 319 |
| 1,5 | 20 | 230 | 0,2 | 12 | 315 |
| 1,4 | 20 | 234 | 0,1 | 10 | 396 |
| 1,2 | 19 | 239 | 0,07 | 9 | 426 |
| 1,0 | 18 | 250 | 0,04 | 8 | 470 |

Распределение частиц по продуктам

Направление движения частиц по столу зависит от плотности и крупности (а также формы), определяющих их распределение по высоте слоя в межрифельном пространстве и соотно-



шения скоростей продольного v_1 , v_2 вибрационного перемещения и поперечного u_1 , u_2 – под действием смывной воды (рисунок 4) [1].

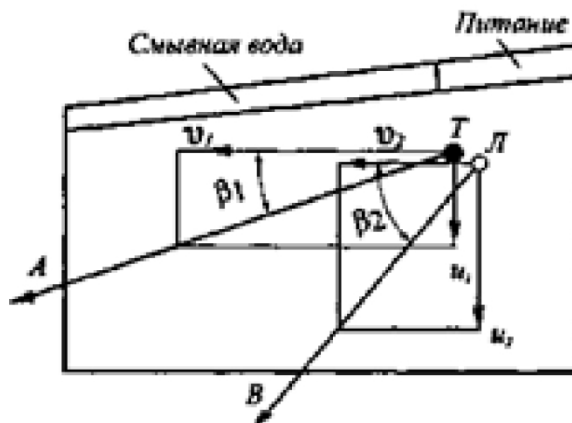


Рис. 4. Схема направлений движения частиц на поверхности концентрационного стола:
 T – плотная (тяжелая) частица; L – легкая частица; A , B – направления движения, соответственно, плотной и легкой частиц; v_1 , v_2 – скорости поперечного движения этих частиц

Поскольку в нижних слоях межрифельного пространства в результате сегрегации концентрируются мелкие плотные частицы, они в меньшей степени смываются водой. Поперечное их перемещение в основном связано с уменьшением высоты нарифлений в направлении движения частиц. Угол β_1 , определяющий усредненное направление их движения, сравнительно небольшой.

Крупные тяжелые частицы, расположенные над мелкими частицами той же плотности, по мере уменьшения высоты рифлей подвергаются более сильному действию смывной воды, и угол β_1 для них увеличивается.

Мелкие легкие частицы, расположенные над крупными тяжелыми, смываются водой позже крупных легких, и угол β_1 для них также меньше в сравнении с крупными легкими, располагающимися в самых верхних слоях межрифельного пространства.

Соотношения длины зон и классификация продуктов зависят от гранулометрического и фракционного составов исходного материала, гидродинамического, вибрационного режимов и т.д. Однако характер распределения частиц различной плотности и крупности по деке показывает, что основой их разделения на столах является сегрегация в межрифельном пространстве, благодаря которой легкие и крупные частицы вытесняются в верхние слои и сносятся водой в поперечном направлении, а тяжелые мелкие опускаются в нижние слои и транспортируются в продольном направлении.

Фактическая траектория движения частиц по столу представляет ломаную линию, характеризующую периодическое преодоление ими уменьшающейся высоты нарифлений.

Результаты и обсуждение.

На процесс сепарации материала влияют различные конструктивные и технологические факторы [11].

Формы дек - прямоугольная и диагональная. Полезная площадь деки - площадь, занятая рифлями. На прямоугольной деке площадь, занятая рифлями, занимает 60-70 % общей ее площади. Площадь диагональной деки практически вся занята рифлями. В результате столы с диагональными *деками* имеют более высокую удельную производительность и, по данным Р.О. Берта, дают высококачественный концентрат и снижают выход промпродукта.

Угол продольного наклона деки стола изменяется от $-0,003^\circ$ (опускание разгрузочного конца) до $+0,4^\circ$ поднятием (опусканием) разгрузочного конца на 20-70 мм. Увеличение продольного угла наклона деки снижает скорость перемещения частиц в межрифельном пространстве в продольном направлении. Повышение значения угла наклона применяют при переработке крупнозернистых песков. Снижение угла наклона увеличивает транспортирующую способ-



ность стола. Однако продольный угол наклона деки, образующийся при опускании ее разгрузочного конца ниже горизонтального положения, должен быть не больше угла заострения рифлей, так как вода потечет не только поперек, но и вдоль этих рифлей. Небольшие углы наклона применяют при концентрации тонкозернистых и шламистых материалов. Продольный угол наклона регулируют обычно при существенном изменении содержания тяжелых фракций и крупности исходного материала.

Угол поперечного наклона деки изменяется в пределах от 1 до 6° (10°), он увеличивается с повышением крупности исходного материала и плотности частиц. При обогащении мелкозернистого материала угол наклона обычно равен 1,5-2,5°, а при обогащении грубодисперсного увеличивается до 4-8°. Увеличение наклона деки приводит к снижению извлечения тяжелых фракций. Чрезмерно большой поперечный угол наклона деки исключает образование веера и, соответственно, сепарацию частиц.

Поперечный наклон деки, высота нарифлений и расход смывной воды взаимосвязаны и являются основными регулирующими параметрами процесса концентрации. Оптимальное их соотношение определяется экспериментально для конкретного исходного материала.

Смывная вода необходима для удаления частиц легких минералов, верхний слой которых постепенно выходит из-за рифлей по мере уменьшения их высоты к разгрузочному концу деки. Количество смывной воды обычно выражается Ж:Т. Оптимальная разжиженность исходной пульпы Ж:Т от 3:1 до 6:1 в зависимости от свойств материала. При небольшом расходе воды, малом поперечном угле деки и высоких рифлях наблюдается большая транспортирующая способность стола в продольном направлении. Легкие минералы верхнего слоя транспортируются совместно с тяжелыми минералами в тяжелый продукт. Большой расход смывной воды, особенно при чрезмерном поперечном наклоне деки и недостаточной ее транспортирующей способности, приводит к выносу плотных частиц из межрифельного пространства в легкий продукт.

Размах и частота колебаний деки определяют степень разрыхления слоя частиц в межрифельном пространстве и скорость их транспортирования в продольном направлении. Теоретического описания оптимальных значений размаха и частоты колебаний деки стола нет. Это связано с многофакторностью процессов разрыхления и транспортирования частиц. Так, например, скорость продольного транспортирования зависит от вибрационного ускорения деки, угла ее наклона, угла вибрации, степени асимметричности ускорений в прямом и обратном движениях стола, крупности, плотности, формы частиц и т.д.

Факторы, влияющие на процесс концентрации на круглом концентрационном столе

Работа круглых столов во многом похожа на работу плоских качающихся (назовем их классическими) столов. Соответственно, многие факторы, влияющие на разделение материала, будут сходными с приведенными для классических столов. Но на круглом столе несколько факторов работают иначе, кроме того, появляются новые факторы. Форма деки стола (круглая) влияет не только на удельную производительность, но и обеспечивает появление на поверхности деки центробежной силы, существенно влияющей на разделение частиц. Вращательное асимметрично-реверсивное движение стола обеспечивает появление тангенциальных инерционных сил, влияющих как на разрыхление материала, так и на его сепарацию; также частота и размах колебаний круглой деки стола задают скорость и ускорение прямого и обратного вращения деки аппарата. Рассмотрим работу круглого концентрационного стола более подробно.

Круглый стол [12] работает следующим образом: привод стола обеспечивает асимметричное вращение деки вокруг вертикальной оси, т.е. по ходу вращения (здесь по часовой стрелке) дека движется с меньшим ускорением и скоростью, а при противоположном вращении (противоходе) дека движется с большим ускорением и скоростью (рисунок 5). Форма движения деки отличается от формы движения деки с классическим приводом (таким как инерционный), т.к. здесь использован современный электропривод – шаговый двигатель, который позволяет регулировать движение деки гораздо более свободно. Материал из распределительного бункера вымывается на поверхность деки. На работающем столе одновременно идут три процесса: разрыхление материала, его смывание по радиусу и транспортировка вдоль рифлей. Разрыхление, являющееся необходимым условием разделения, происходит в основном из-за асимметричного



вращения деки. Смывание по радиусу осуществляется за счет подачи смывной воды и центробежной силы, транспортировка вдоль рифлей происходит также за счет ассиметричного вращения деки. Частицы разделяются в соответствии с их плотностью, крупностью и формой (рисунок 6).

На круглом столе центробежное ускорение и скорость растут от нуля в центре стола до максимума на периферии, так же линейные ускорение и скорость изменяются по радиусу.

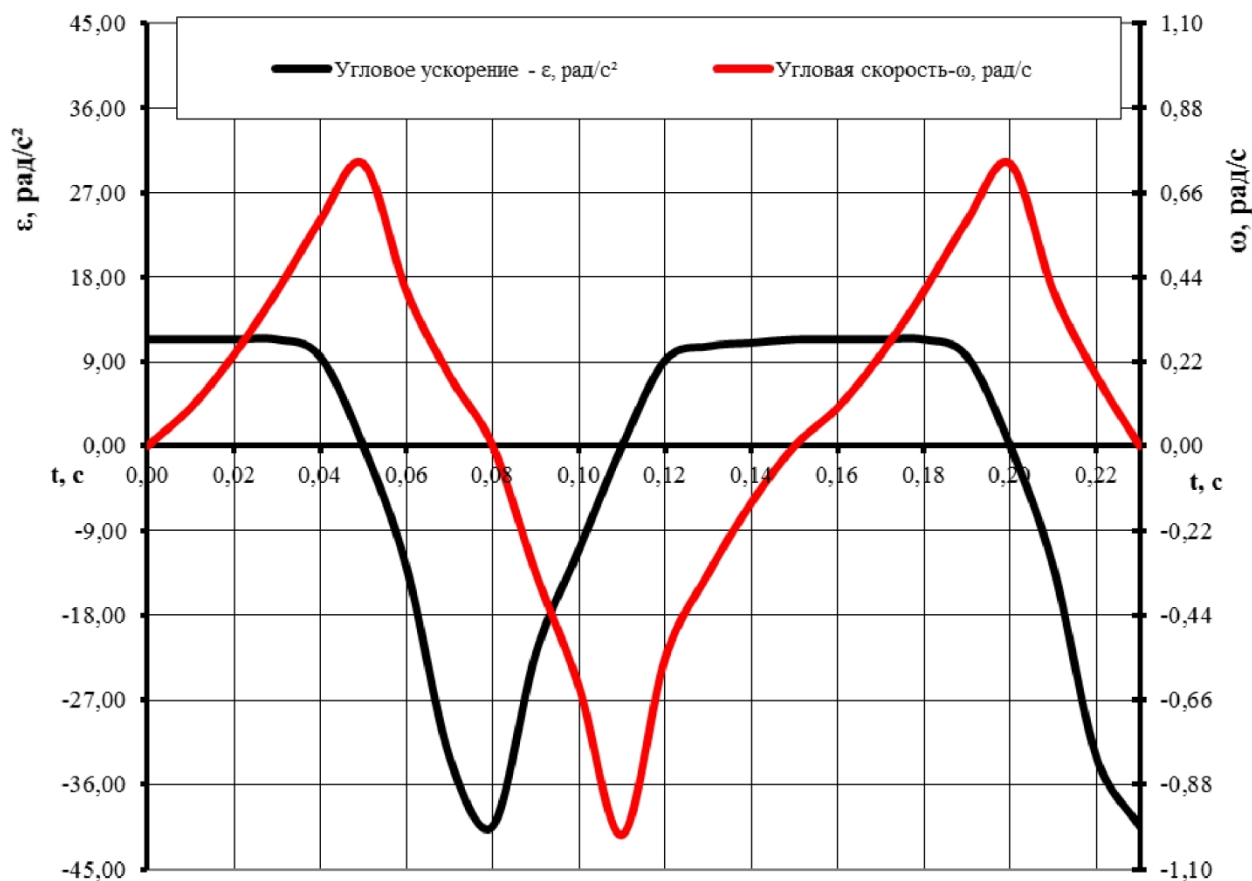


Рис.5. Диаграмма скоростей и ускорений на круглом столе

Поток воды малой толщины, текущей по рабочей поверхности аппарата, испытывает сопротивление, обусловленное наличием рифлей, частицами, находящимися на поверхности, шероховатостями поверхности. Сопротивление усиливается за счет движения рабочей поверхности. Эти факторы вызывают вихреобразование в потоке жидкости, причем вихри разнонаправлены. Все это создает сложные условия движения зерен.

Частица, находящаяся в струе воды, текущей по вращающейся поверхности, в общем случае испытывает действие сил (рисунок 6):

- вес тела в среде (сила тяжести минус сила Архимеда);
- динамическое давление потока воды;
- динамическое действие вертикальной составляющей скорости, возникающей за счет турбулентности потоков воды;
- сила трения, которая направлена в сторону, противоположную относительному перемещению частицы, и пропорциональна нормальному давлению ее на плоскость;
- центробежная сила, лежащая в плоскости, перпендикулярной оси вращения;
- сила инерции, вызванная вращением рабочей поверхности.

При этом сила инерции существенно зависит от того, вращается ли рабочая поверхность постоянно или совершает вращательно-реверсивные движения. Во втором случае сила инерции



больше, и частицы, различающиеся по плотности, крупности и форме, движутся по более растянутым траекториям, что позволяет повысить эффективность их разделения (рисунок 6).

Частицы могут двигаться перекачиванием и скольжением по дну, скачкообразным движением с периодическим касанием дна и частично во взвешенном состоянии либо полностью во взвешенном состоянии. Перемещение частиц скольжением и перекачиванием происходит под действием сил, указанных на рисунке 6. Перемещение частиц во взвешенном состоянии происходит под действием тех же сил за исключением силы трения о поверхность.

Основой процесса разделения на столах является сегрегация в межрифловом пространстве. Разрыхление слоя частиц создается в основном колебаниями деки.

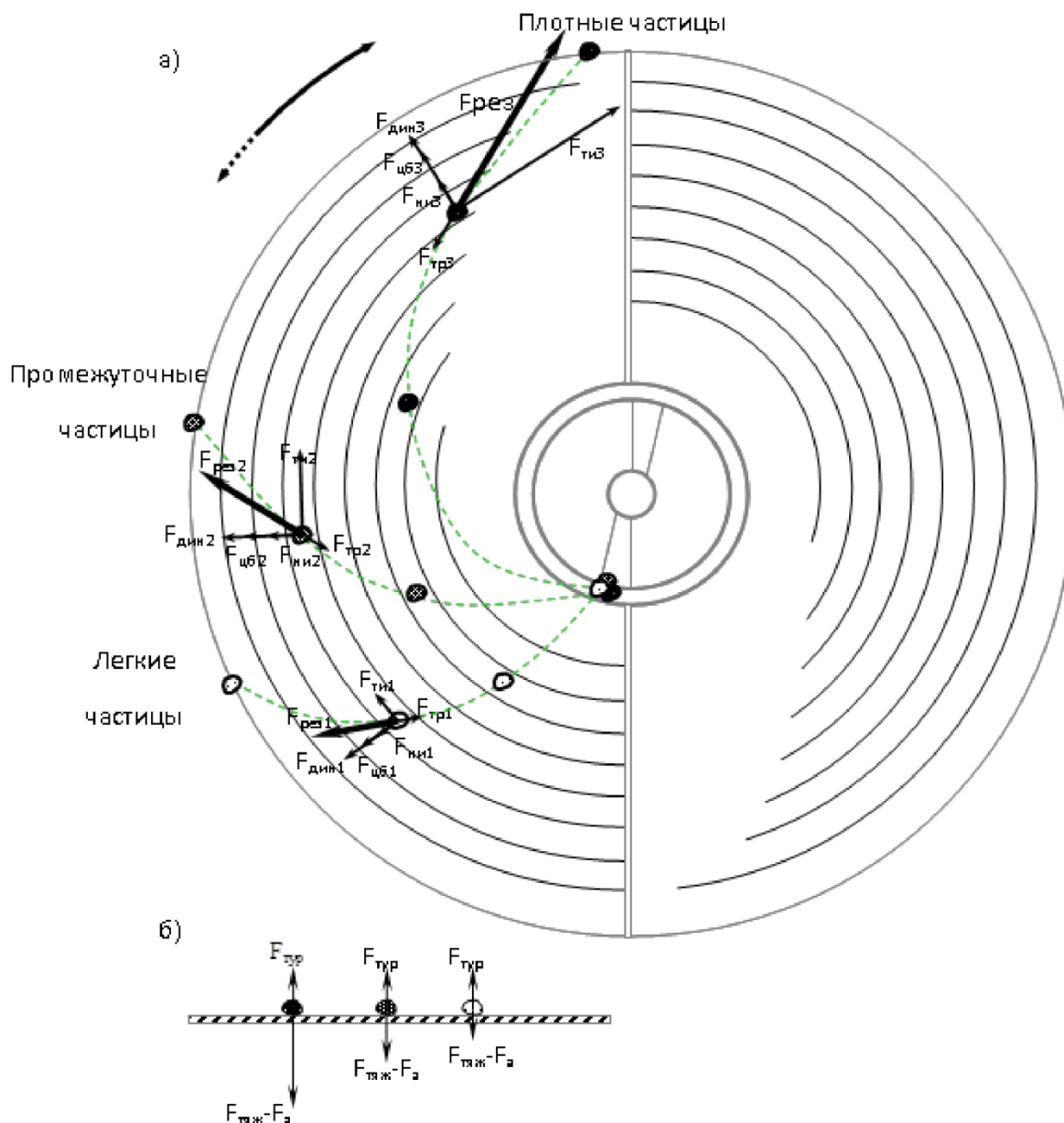


Рис.6. Силы, действующие на частицы на круглом столе: а – вид сверху; б – разрез.
 $F_{ти}$ – тангенциальная составляющая силы инерции; $F_{ни}$ – нормальная составляющая силы инерции; $F_{цб}$ – центробежная сила; $F_{рез}$ – результирующая сила, $F_{тр}$ – сила трения; $F_{дин}$ – сила динамического давления потока воды; $F_{тяж}$ – сила тяжести; F_a – сила Архимеда; $F_{тур}$ – сила турбулентных потоков воды



Разделение материала обусловлено многими факторами. Каждая частица обогащаемого материала в зависимости от плотности и крупности (иногда и формы, если частицы имеют заметные различия в коэффициенте сферичности) приобретает определенную скорость и направление движения по рабочей поверхности. При асимметричных движениях стола частице сообщается прерывистое поступательное движение со скоростью v , направленной практически перпендикулярно направлению скорости потока смывной воды (по дуге), одновременно за счет динамического давления потока воды частица перемещается в радиальном направлении со скоростью c .

Движение зерен, различающихся плотностью и размерами (и формой), оказывается неодинаковым, т.к. «расклад» сил, действующих на них, различный. Для тяжелых частиц преобладающими являются силы тяжести и инерционная сила, поэтому они движутся в межрифловом пространстве до конца рифлей и разгружаются в соответствующий сборник.

При этом, поскольку основной механизм разделения на столе – это сегрегация, то в нижние слои перемещаются мелкие плотные частицы, выше находятся плотные крупные частицы (или смесь плотных крупных и мелких легких частиц), еще выше – крупные легкие частицы. Поэтому мелкие плотные частицы мало смываются водой в легкие фракции (что повышает эффективность разделения). Форма частиц (при прочих равных условиях) влияет следующим образом: чем выше коэффициент сферичности, тем в более низком слое оказывается частица.

Для легких частиц преобладающими являются гидродинамическая сила и подъемная турбулентная сила, поэтому легкие частицы смывает в радиальном к деке направлении. Для частиц промежуточной плотности вклад вышеуказанных сил примерно одинаков, поэтому они попадают между тяжелыми и легкими частицами.

Плотность частиц и легкого, и тяжелого минералов изменяется в некоторых диапазонах из-за наличия сростков. Кроме того, на движение частиц влияет крупность и форма частиц, поэтому имеет место так называемый веер частиц на столе. На рисунке 7 показано движение частиц по деке и дискового концентрационного стола с тремя радиусами деки [13].

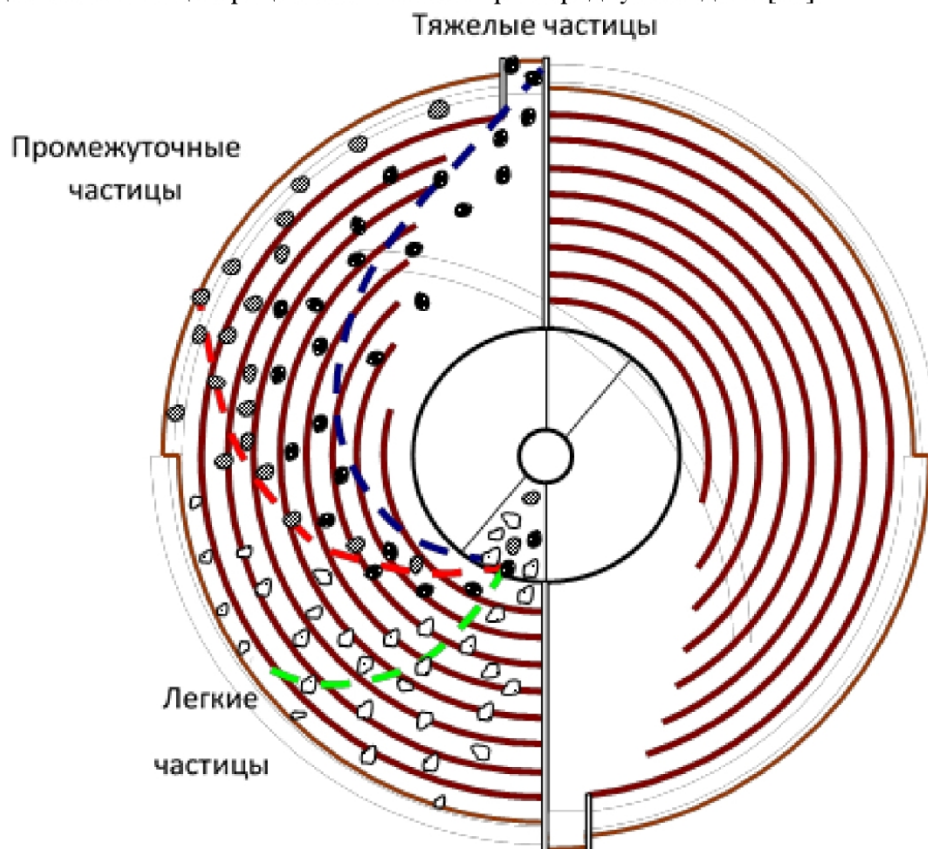


Рис. 7. Динамика движения частиц различной плотности.
Штриховыми линиями показаны «средние» траектории движения частиц



Т.к. центробежная сила в зоне, близкой к центру стола, мала, то в зоне подачи питания разрыхления практически нет, и лишь на некотором расстоянии от центра деки ускорения будет достаточно для того, чтобы происходило разрыхление и началось разделение материала. Но с определенного расстояния от центра деки ускорение будет слишком велико и начнется перемешивание частиц, т.к. стол имеет рабочую кольцевую зону строго определенных размеров.

Кроме того, центробежная сила переменная: в момент, когда стол не вращается, центробежной силы нет, потом он начинает вращаться, и появляется центробежная сила, доходит до какого-то предела; потом стол останавливается и крутится в обратную сторону, тогда центробежная сила у него становится сначала равна 0, а потом снова увеличивается, т.е. центробежная сила «пульсирует», что дополнительно разрыхляет материал. Направление центробежной силы постоянно (по радиусу).

За счет воздействия на частицы дополнительной центробежной силы появляется возможность обогащать более мелкие фракции руд и материалов, чем на традиционных столах.

Выводы.

1. Как в гравитационных, так и в гравитационно-центробежных полях частицы, различающиеся плотностью, размерами и формой, движутся по различным траекториям, что дает возможность их разделять, но в гравитационно-центробежных полях различия в траекториях являются более существенными, поэтому эффективность разделения в гравитационно-центробежных полях выше.

2. Использование гравитационно-центробежных полей позволяет снизить минимальную крупность обогащаемого материала, что повышает суммарное извлечение плотных частиц.

3. Рассмотренные теоретические положения показывают возможность использования гравитационно-центробежных полей для повышения эффективности разделения мелких частиц гравитационным методом. Эти результаты могут быть использованы для совершенствования конструкции круглого концентрационного стола.

Список источников

1. Кизевальтер Б.В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения / М.: Недра, 1979.
2. Верхотуров М.В. Гравитационные методы обогащения: учебн. для вузов – М.: МАКС Пресс, 2006. – 352 с.
3. Лященко П.В. Гравитационные методы обогащения / Учебн. для горных вузов, М., Л.: 1940.
4. Таггарт А.Ф. Справочник по обогащению полезных ископаемых, том III Процессы обогащения и обезвоживания, Ленинград-Москва-Новосибирск: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1952. - 990 с.
5. Таггарт А.Ф. Справочник по обогащению полезных ископаемых. Ленинград-Москва-Новосибирск: Государственное научно-техническое горно-геолого-нефтяное изд., 1933, том II - 535 с.
6. Годэн А.М. Основы обогащения полезных ископаемых. – М., Л.: 1946.
7. Дайер Ф.С. О расслоении металлических и деревянных шариках по удельному весу и крупности // Engineering and Mining Journal. – vol. 26. – 1929.
8. Богданович А. В. Исследование работы гравитационных сепараторов для обогащения тонкозернистых материалов / А. В. Богданович, А. М. Васильев // Обогащение руд. – 2005. – № 1. – С. 12 – 15.
9. Исаев И.Н. Распределение минеральных зерен на деке концентрационного стола // Обогащение руд. – №2. – 1959.
10. Исаев И.Н. Исследование влияния различных форм нарифлений концентрационного стола на повышение эффективности его работы. – Институт Механообр, технический отчет, 1955.
11. Исаев И. Н. Концентрационные столы. – М., 1962.
12. Андреев Е.Е., Кусков В.Б., Кускова Я.В., Цай А.Г. Круглый вращающийся концентрационный стол // Обогащение руд. – 2009. – №3. – С. 35-36.
13. Кускова Я.В. Аппарат для гравитационного обогащения мелких частиц // Записки Горного института. – 2010. – Т.186. – С.188-190.



14. R.D. Morrison and J.M. Richardson / JK-SimMet: A Simulator for Analysis, Optimization and Design of Comminution Circuits // Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control: Proceedings. Vol. 1. / Ed. By A.L. Mular, D.N. Halbe and D.J. Barratt. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2002.
15. M.C. Harris, K.C. Runge, W.J. Whiten and R.D. Morrison / JK-SimFloat as a Practical Tool for Flotation Process Design and Optimization // Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control: Proceedings. Vol. 1. / Ed. By A.L. Mular, D.N. Halbe and D.J. Barratt. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2002.

References

1. Kizeval'ter B.V. Teoreticheskie osnovy gravitacionnyh processov obogashcheniya / M.: Nedra, 1979.
2. Verhoturov M.V. Gravitacionnye metody obogashcheniya: uchebn. dlya vuzov – M.: MAKS Press, 2006. – 352 s.
3. Lyashchenko P.V. Gravitacionnye metody obogashcheniya / Uchebn. dlya gornyh vtuzov, M., L.: 1940.
4. Taggart A.F. Spravochnik po obogashcheniyu poleznyh iskopaemyh, tom III Processy obogashcheniya i obezvozhivaniya, Leningrad-Moskva-Novosibirsk: Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo literatury po chernoj i cvetnoj metallurgii, 1952. - 990 s.
5. Taggart A.F. Spravochnik po obogashcheniyu poleznyh iskopaemyh. Leningrad-Moskva-Novosibirsk: Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe gorno-geologo-neftyanoe izd., 1933, tom II - 535 s.
6. Godehn A.M. Osnovy obogashcheniya poleznyh iskopaemyh. – M., L.: 1946.
7. Dajer F.S. O rassloenii metallicheskih i derevyannyh sharikah po udel'nomu vesu i krupnosti // Engineering and Mining Journal. – vol. 26. – 1929.
8. Bogdanovich A. V. Issledovanie raboty gravitacionnyh separatorov dlya obogashcheniya tonkozemnyh materialov / A. V. Bogdanovich, A. M. Vasil'ev // Obogashchenie rud. – 2005. – № 1. – S. 12 – 15.
9. Isaev I.N. Raspreделение mineral'nyh zeren na deke koncentracionnogo stola // Obogashchenie rud. – №2. – 1959.
10. Isaev I.N. Issledovanie vliyaniya razlichnyh form nariflenij koncentracionnogo stola na povysenie ehffektivnosti ego raboty. – Institut Mekhanobr, tekhnicheskij otchet, 1955.
11. Isaev I. H. Koncentracionnye stoly. – M., 1962.
12. Andreev E.E., Kuskov V.B., Kuskova YA.V., Caj A.G. Kruglyj vrashchayushchij koncentracionnyj stol // Obogashchenie rud. – 2009. – №3. – S. 35-36.
13. Kuskova YA.V. Apparat dlya gravitacionnogo obogashcheniya melkih chastic // Zapiski Gornogo instituta. – 2010. – T.186. – S.188-190.
14. R.D. Morrison and J.M. Richardson / JK-SimMet: A Simulator for Analysis, Optimization and Design of Comminution Circuits // Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control: Proceedings. Vol. 1. / Ed. By A.L. Mular, D.N. Halbe and D.J. Barratt. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2002.
15. M.C. Harris, K.C. Runge, W.J. Whiten and R.D. Morrison / JK-SimFloat as a Practical Tool for Flotation Process Design and Optimization // Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control: Proceedings. Vol. 1. / Ed. By A.L. Mular, D.N. Halbe and D.J. Barratt. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2002.

Авторы

Кускова Яна Вадимовна, кандидат технических наук, ассистент каф обогащения полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета

Authors

Yana Kuskova, Candidate of Technical Sciences, Assistant of Mineral Processing, St. Petersburg Mining University

Библиографическое описание статьи

Кускова Я.В. Использование гравитационно-центробежных полей для повышения эффективности разделения мелких частиц гравитационным методом // Техника и технология горного дела. – 2018. – № 3(3). – С. 29-41.

Cite this article

Kuskova Ya. Use of gravitational-centrifugal fields to increase the efficiency of small particles' separation by the gravity method, *Journal of mining and geotechnical engineering*, **3(3):29**.