

УДК 622.7

В.В. Кармазин, Р.В. Ковалев, Г.А. Епугаев

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ
ЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ РУД
ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ПОЛЕ БАРАБАННОГО
СЕПАРАТОРА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ**

Вопросам закономерностей поведения частиц железосодержащих руд во вращающемся поле посвящено большое количество практических и теоретических исследовательских работ, в частности работах [1, 2]. Сложились однозначные представления об образовании флоккул в неподвижных и медленно вращающихся магнитных полях. Гранулометрическая характеристика измельченной железной руды не бывает однородной, и в зависимости от нее на единицу объема всегда имеется одна частица, превосходящая средний размер частиц в несколько раз. Эта частица оказывает доминирующее воздействие на процесс флокулообразования при воздействии внешнего магнитного поля. В некоторых случаях доминирующее воздействие на процесс флокулообразования влияют мелкие частицы, имеющие ось легкого намагничивания. Флоккула представляет плотный устойчивый агрегат, состоящий как из магнитных, так и не магнитных частиц. При вращающемся с малой скоростью магнитным полем флоккулы стремятся своей длинной осью поворачиваться по направлению вектора напряженности магнитного поля и практически совпадать с этим

направлением. При любом шаге полюсов флоккулы над центрами полюсов располагаются вертикально, между полюсами они принимают горизонтальное положение. Затем, следуя изменяющемуся направлению магнитного поля, снова займут вертикальное положение, но будут иметь новую вещественную структуру.

При сухой и мокрой сепарации считают, что при увеличении скорости вращения поля имеет место разрушение флоккул. Возможны два варианта разрушения. Это действие растягивающей и центробежной сил, возникающих при вращении частиц вокруг своих осей. Разрушение флоккул происходит до размера частиц магнетита. Этот процесс подтверждается экспериментальными данными фотометрии. При сухой сепарации сепарируемая масса движется в виде турбулентного облака, а при мокрой сепарации эта масса движется в виде двухфазного турбулентного потока жидкость - твердая фаза.

Исследования последних лет в области аналитического описания магнитных полей с использованием теории функций комплексного переменного и интегралов типа Коши позволили получить описания полей маг-

нитных индукций и векторного магнитного потенциала барабанных сепараторов на постоянных магнитах. В дальнейшем на основе этих разработок удалось построить поля пондеромоторных сил как декартовых, так в полярных координатах.

Анализ существующих представлений о процессах движения частиц сепарируемого материала показал, что на процесс разрушения флоккул влияют не только вышеуказанные факторы, но и процесс вращения частиц. Нет систематизированной трактовки физики разделения агрегатов из полидоменных структур и кластеров.

Целью представленной работы является аналитическое исследование процессов вращения частиц обогащаемого материала во вращающемся магнитном поле магнитного сепаратора ВПБМ-32.5/20. Этот процесс происходит в турбулентных воздушных или водных потоках. Результаты исследований в ламинарных потоках представляют собой закономерность протекания процессов обогащения, а в турбулентных потоках только тенденцию их протекания.

Для исследования сил и моментов, действующих на флоккулу, ее вещественный состав условно представим в виде:

1. Диамагнитные и парамагнитные частицы, бедные сростки ферромагнетиков и другие жесткие структуры, обладающие малой удельной магнитной восприимчивостью.

2. Богатые сростки ферромагнетиков и полидоменные агрегаты, имеющие магнитные связи, которые во внешнем магнитном поле обладают наведенным вектором намагниченности.

3. Монодоменные зерна, имеющие легкую ось намагничивания и обладающих намагниченностью вращения, которые входят в состав полидоменных агрегатов с магнитными связями.

Диамагнитные и парамагнитные частицы, бедные сростки ферромагнетиков и другие жесткие структуры, обладающие малой удельной магнитной восприимчивостью, под действием центробежные силы и силы трения турбулентных потоков воздуха или жидкости выносятся в турбулентный поток.

Богатые сростки ферромагнетиков в отсутствии внешнего магнитного поля практически не создают своего магнитного поля. Если к этому сростку приложить внешнее магнитное поле, то появится вектор наведенной намагниченности $\vec{J} = \chi_m \vec{H}$, который при любой практической возможной скорости вращения магнитного поля будет совпадать с вектором напряженности этого поля. Тогда на этот сросток всегда будет действовать практически только радиальная составляющая пондеромоторной силы, направленная в сторону рабочей поверхности барабана. В тоже время имеют место центробежные силы и силы трения турбулентных потоков воздуха или жидкости, которые стремятся оторвать сросток от поверхности барабана. Практика испытаний полупромышленного сепаратора показала, что слой ферромагнитных фракций не смывается даже встречной струей потока жидкости. Снять с барабана обогащенный продукт можно только с помощью вращающейся щетки.

При увеличении скорости вращения магнитного поля частицы и агрегаты внутри флоккулы, имеющие лег-

кую ось намагничивания, начнут вращаться. Эти магнитные образования включены во флоккул хаотично и имеют стесненные степени свободы движения, поэтому флоккула станет более рыхлой, магнитные связи ослабеют. Воздушные, водные потоки и центробежные силы начнут разрушать флоккул и ее более мелкие составляющие, будут переноситься в эти потоки. В воздушной среде возникнут двухфазные потоки (облако). В водной среде также будет двухфазный поток жидкость - твердое. В эти потоки перенесутся и практически все слабомагнитные и немагнитные составляющие обогащаемого материала.

Объектом данного исследования являются магнитные частицы и различные образования, имеющие легкую ось намагничивания. Эти компоненты обогащаемого материала находятся в воздушном или в водном потоках.

Вращательное движение магнитных частиц описывается дифференциальным уравнением:

$$J \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + \eta \cdot \frac{d\theta}{dt} - V J_s B \cdot \sin(\theta) = 0, \quad (1)$$

где J - момент инерции частицы, J_s - намагниченность частицы, B - магнитная индукция, θ - угол между вектором магнитной индукции и вектором намагниченности частицы, η - приведенный коэффициент вязкости среды с учетом формы и размеров частицы, V - объем частицы, m - масса частицы, t - время.

Это уравнение описывает вращательное движение частицы с учетом вязкости среды.

На элементарный магнитный момент в неоднородном магнитном поле действует пара сил, стремящаяся со-

вместить его с направлением внешнего поля. Третий член суммы левой части этого уравнения определяет собой магнитный момент.

Для расчета поступательного движения частиц необходимо знать аргумент λ вектора намагниченности \vec{J} и угол β - аргумент вектора магнитной индукции \vec{B} .

Тогда

$$\theta = \beta - \gamma \quad (2)$$

При вращении магнитного поля $\beta(t) = \arg(\vec{B}(t))$.

В этом случае уравнение (1) примет вид

$$J \frac{d^2\gamma}{dt^2} + \eta \frac{d\gamma}{dt} - V J_s B \sin(\arg(\vec{B}(t)) - \gamma) = 0 \quad (3)$$

Разработана программа расчета этого уравнения.

Рассмотрено вращательное движение частиц относительно барабана. Принято, что нет степени свободы поступательного движения относительно барабана. Пусть ω_q - угловая скорость вращения частицы, ω_m - угловая скорость вращения магнитной системы, ω_b - угловая скорость вращения барабана, $\omega_{bm} = \omega_b + \omega_m$ - угловая скорость вращения магнитной системы относительно барабана. Если число пар магнитов $\frac{N_mag}{2}$, то частота вращения магнитного поля относительно барабана $\omega = \frac{N_mag}{2} \omega_{bm}$.

Для приведенного ниже расчета принято $\frac{N_mag}{2} = \frac{18}{2} = 9$, для водной среды

$$k_1 = \frac{\eta}{J} = 500 \text{ и.} k_2 = \frac{V J_s}{J} = 3000.$$

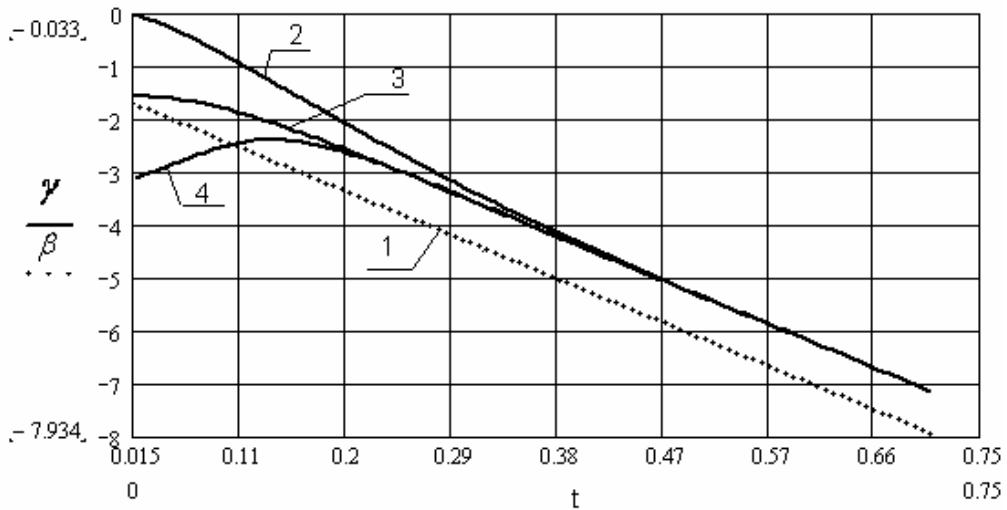


Рис. 1. Графики изменения углов векторов магнитной индукции (1) и вектора намагничивания частицы (2, 3, 4)

Графики изменения углов вектора намагниченности частицы γ и вектора магнитной индукции поля постоянных магнитов β при $\omega = 10$ показаны на рис. 1.

В принятой магнитной системе поле имеет синусоидальный характер, следовательно угол магнитной индукции изменяется по прямой, что соответствует графику 1. При загрузке частицы в шихте расположены хаотично, поэтому начальный угол вектора намагничивания подчиняется вероятностному закону. Принято, что начальными условиями являются для графиков - 2 $\gamma = 0$ рад, -3 $\gamma = -\frac{\pi}{2}$ рад, -4 $\gamma = -\pi$ рад. Эти графики показывают, что независимо от этих начальных условий установившийся режим для них является общим, поэтому в дальнейшем используются самые неблагоприятные начальные условия $\gamma = -\pi$ рад. При вращении частиц их вектор спонтанного намагничивания

отстает от вектора магнитной индукции на угол 0,792 рад.

Построены аналогичные графики (рис. 2) при увеличении вращающего момента ($k_2 = 4000$) и его уменьшении ($k_2 = 2000$)

В первом случае отставание частицы от поля уменьшается до 0,44 рад, а во втором случае увеличивается до 1,48 рад.

Построены графики изменения частоты вращения частицы в зависимости от времени (рис. 3) для рассмотренного выше случая.

Расчет графиков рис. 3 произведен с теми же коэффициентами уравнения вращения частиц для графиков рис. 2. Графики рис. 3 показывают, что при уменьшенном вращающем моменте угловая скорость вращения частицы асимптотически приближается к угловой скорости вращения вектора магнитной индукции (график 1). При увеличенном вращающем моменте угловая скорость вращения части-

цы имеет колебательный характер с большим коэффициентом затухания.

Характер вращения частиц остается неизменным при значительных изменениях коэффициентов уравнения (3).

Результаты проведенных исследований полностью совпадают с установленным представлениями о вращении частиц во вращающихся магнит-

ных полях с малой скоростью. До настоящего времени для больших частот поля нет четких представлений о характере вращения частиц.

Рассмотрен процесс вращения частиц при угловой скорости вращения вектора магнитной индукции $\omega = 30$ рад/с.

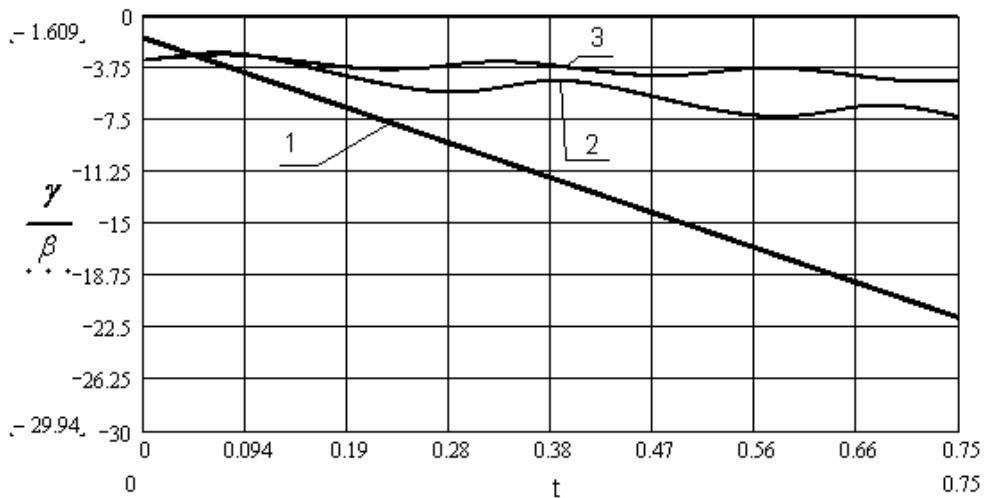


Рис. 4. Графики изменения углов векторов магнитной индукции (1) и вектора намагничивания частицы (2, 3) при $\omega = 30$ рад/с.

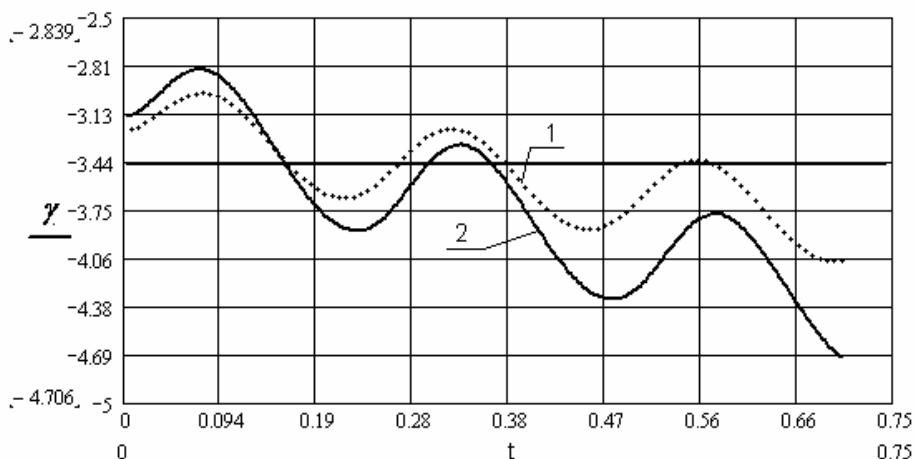


Рис. 5. Графики изменения углов вектора вращения векторов магнитной индукции (1) и вектора намагничивания частицы (2, 3)

На рис. 4 изображены рассчитанные графики изменения угловой скорости вращения векторов магнитной индукции (1) и вектора намагничивания частицы (2). Эти графики показывают, что при различных значениях момента частицы имеют вращательно –

колебательное движение. При этом частота вращения поля почти на порядок выше частоты вращения частицы.

Характер колебаний наглядно представлен на рис. 5.

При большом моменте явно выражено, что изменение угла частицы γ в

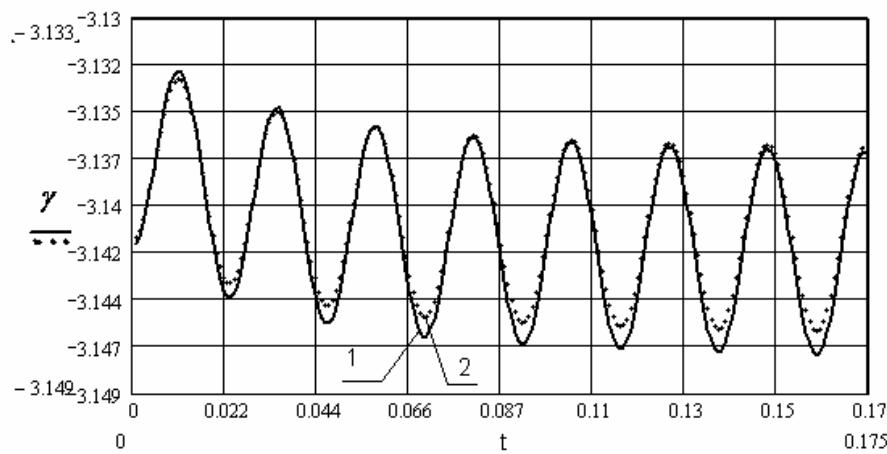


Рис. 6. Графики изменения углов вектора намагничивания частицы (1, 2)
 $\omega = 300 \text{ рад/с.}$

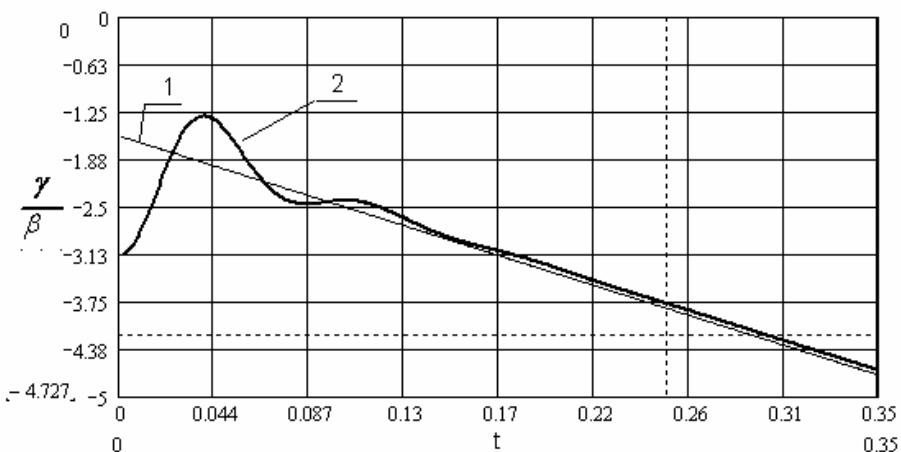


Рис. 7. Графики изменения углов векторов магнитной индукции (1) и вектора намагничивания частицы (2) в воздушной среде

сторону вращения поля угол протекает более интенсивно и большее время, чем когда этот угол изменяется в обратную сторону. Такое изменение угла определяет вращение частицы, но с малой скоростью. При дальнейшем увеличении частоты вращение частиц не происходит.

Графики рис. 6 рассчитаны для частоты поля $\omega = 30 \text{ рад/с}$ при большем моменте (график 1) и при меньшем моменте (график 2). В обоих случаях практически нет вращательного движения. Существует только колебательное движение. При этом при колебании угол в среднем изменяется на величину только на 0,091 рад.

По представленным исследованиям вращения частиц в водной среде сделаны следующие выводы:

1. При малых частотах вращающегося магнитного поля частица вращается вместе с полем, отставая от него на некоторый угол.
2. При увеличении частоты частица совершает вращательно – колебательное движение.

3. При высоких частотах поля частица совершает только колебательное движение.

Вращательное движение в воздушной среде изучалось с учетом того, что вязкость воздуха на два порядка меньше вязкости воды, но в сепараторе имеем двухфазный мелкодисперсный поток воздуха с частицами шихты. Принято, что всех графиков $k_1 = 50$ и для графиков 1- $k_2 = 3000$.

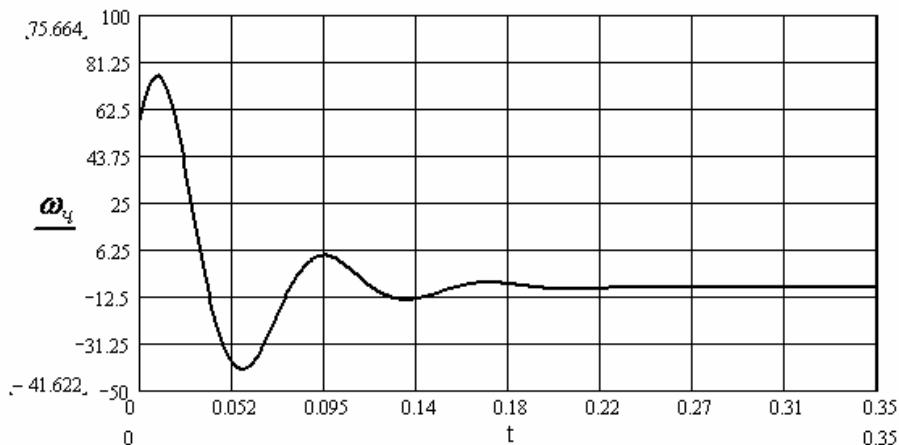


Рис. 8. График изменения угловой скорости вращения вектора намагничивания частицы в воздушной среде

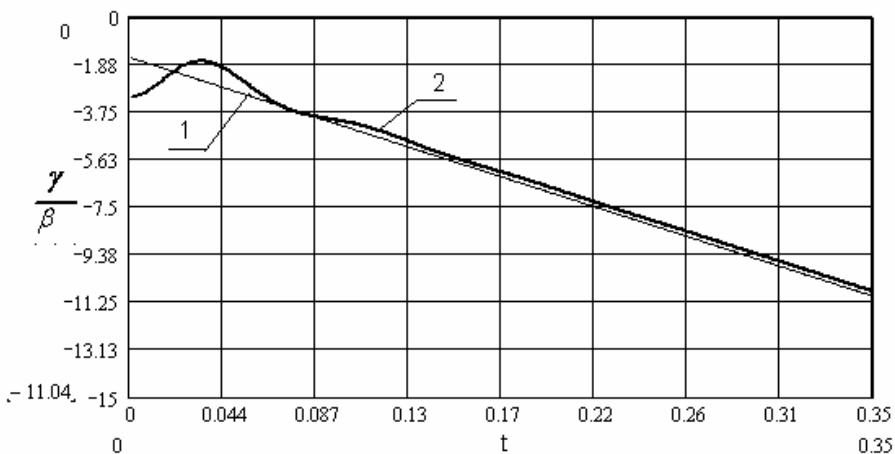


Рис. 9. График изменения угла вектора намагничивания частицы в воздушной среде при 30 рад/с

На рис. 7 показаны графики изменения углов векторов магнитной индукции (1) и вектора намагничивания частицы (2) в воздушной среде. Они показывают, что в начале быстро затухает переходный колебательный и в установившемся процессе частица вращается вместе с полем, отставая от него на незначительный угол.

Построены графики изменения частоты вращения частицы в зависи-

мости от времени (рис. 8) для рассмотренного выше случая.

График рис. 8 показывает, что угловая скорость вращения вектора намагничивания частицы в воздушной среде достигает значения $75,6 \text{ рад/с}$ и быстро затухает

Характер вращения частицы с увеличением угловой поля до 30 рад/с не изменяется (рис. 9).

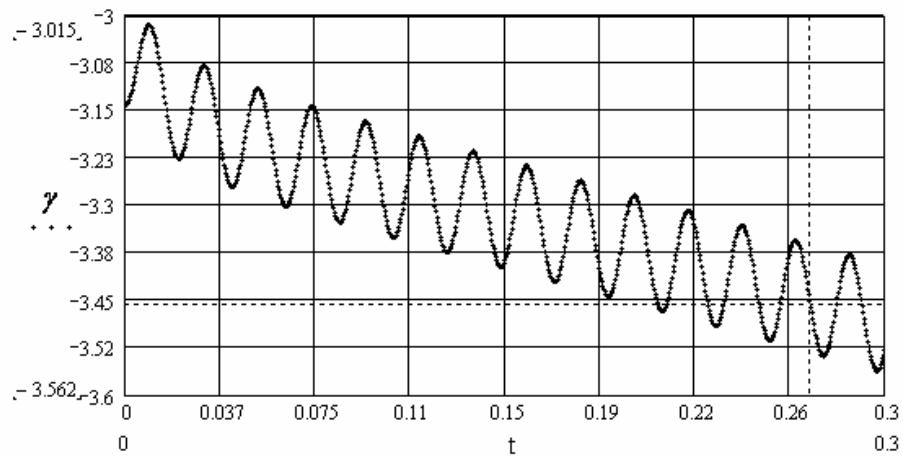


Рис.10. График изменения угла вектора намагничивания частицы в воздушной среде при 100 рад/с

При дальнейшем увеличении частоты до 100 рад/с частица совершает медленное вращательное движение с малой частотой, на которое накладывается колебательное движение (рис. 10).

На основании результатов проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Выведено дифференциальное уравнение, описывающее вращательное движение частицы во вращающемся магнитном поле постоянных магнитов.

2. Исследован механизм вращения частиц в водной и в воздушной средах.

3. Выявлено, что в рассмотренном сепараторе наиболее легко обогащаются агрегаты с наведенным вектором намагниченности.

4. Результаты исследований позволяют рассмотреть закономерности совместного вращательного и поступательного движения и выявить механизм разрушения агрегатов с магнитными связями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кармазин В.В., Кармазин В.И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения. – М: Изд. МГТУ, 2005.
2. Епугаев Г.А. Основы аналитической теории взаимодействия минералов с полем сепаратора на постоянных магнитах. - Владикавказ, РИА, 1999.

Коротко об авторах

Кармазин Виктор Витальевич – академик МИА и РАН, профессор, доктор технических наук,
Ковалев Р.В. – аспирант,
Епугаев Г.А. – профессор, доктор технических наук,
Московский государственный горный университет.