

А.С. Опалев, В.В. Бирюков, И.В. Новикова
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
МАГНИТОСТАБИЛИЗИРОВАННОГО
ОЖИЖЕННОГО СЛОЯ В РАБОЧЕМ ОБЪЕМЕ
МАГНИТНО-ГРАВИТАЦИОННОГО СЕПАРАТОРА

Рассмотрены теоретические основы процесса формирования магнито-стабилизированного ожигенного слоя (MSFB) с учетом магнитных взаимодействий между ферромагнитными частицами. Представлены графические результаты моделирования поведения частиц с различными физическими свойствами в рабочем объеме магнитно-гравитационного сепаратора.

Ключевые слова: агнито-стабилизированный ожигенный слой (MSFB), магнитное межчастичное взаимодействие, магнитно-гравитационная сепарация, многофазное течение, рабочий объем, компьютерное моделирование.

В Горном институте Кольского научного центра РАН разработан ряд конструкций магнитно-гравитационных сепараторов, пригодных для селективного разделения тонкоизмельченных магнетитовых руд [1]. В аппаратах, использующих магнитно-гравитационный принцип сепарации, разделение происходит при фильтрации центробежно-восходящего потока жидкости через ожигенный слой магнитоагрегированной суспензии. При этом разделяемые минеральные частицы в зависимости от их физических свойств – крупности, плотности и магнитной восприимчивости – могут находиться в одном из нескольких состояний: плотного слоя, осаждения, ожигенного слоя и гидротранспорта в зависимости от скорости фильтрующей жидкости и напряженности магнитного поля.

Эффект формирования ожигенного слоя из ферромагнитных частиц в восходящем водном потоке при помещении его в однородное магнитное поле (magnetized stabilized fluidized beds – MSFB), феноменология которого исследована Филипповым [2, 3], а теоретическое описание представлено в работах Розенцвейга и Зигеля [4–6], положен в основу разработки аналитической модели формирования ферромагнитного слоя суспензии в магнитно-гравитационном аппарате как разделительной среды при сепарации минеральных частиц с применением программного комплекса ANSYS – Fluent (CFD).

Для описания многофазных течений использовался математический аппарат многофазного многоскоростного континуума с введением фазных объемных долей α , которые определяют удельный объем, занятый каждой фазой, и законы сохранения массы и импульса для каждой фазы индивидуально [7]. Система уравнений сохранения определяет в среднем локальное мгновенное равновесие для каждой из фаз.

Уравнение сохранения импульса для s -ой твердой фазы:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \alpha_s \rho_s (\vec{F}_s + \vec{F}_{a,s} + \vec{F}_{vm,s}) + \sum_{l=1}^N \left(K_{ls} (\vec{v}_l - \vec{v}_s) + m_{ls} \vec{v}_{ls} \right) \quad (1)$$

где ρ – плотность фазы; \bar{v}_s, \bar{v}_l – скорости соответственно твердой и жидкой фазы; p_s – давление s -ой твердой фазы; $K_{ls} = K_{sl}$ – коэффициент передачи импульса между жидкостью и твердой фазой s .

$$K_{sl} = \frac{\alpha_s \rho_s f}{\tau_s} \quad (2)$$

где f – функция взаимодействия; $\tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18\mu_l}$ – время релаксации, d_s – диаметр частиц фазы s .

Функция взаимодействия f включает коэффициент сопротивления C_D , который основан на числе Рейнольдса Re_s .

При аналитическом описании течения ферромагнитной суспензии использовалась модель Гидаспова [8]. В случае, если $a_1 > 0,8$, то коэффициент взаимодействия между твердой и жидкой фазами K_{sl} имеет следующую форму:

$$K_{sl} = \frac{3}{4} C_D \frac{a_s a_l \rho_l |\bar{v}_s - \bar{v}_l|}{d_s} a_l^{-2,65} \quad (3),$$

где $C_D = \frac{24}{a_l Re_s} \left[1 + 0,15 (a_l Re_s)^{0,687} \right]$ – коэффициент гидродинамического сопротивления.

В случае, если $a_1 \leq 0,8$, то:

$$K_{sl} = 150 \frac{a_s (1 - a_l) \mu_l}{a_l d_s^2} + 1,75 \frac{\rho_l a_s |\bar{v}_s - \bar{v}_l|}{d_s} \quad (4)$$

Для описания эффекта снижения гидродинамического сопротивления сформированных магнитных вертикально ориентированных агрегатов использовались данные, приведенные в работе [9], в которой исследовались параметры гравитационного осаждения магнетитовых агрегатов в слабых магнитных полях (1–20 кА/м). Используя формулу Ламба для поперечного обтекания цилиндра и результаты работы [10], согласно которой сила сопротивления при продольном обтекании и при вращении цилиндра не зависит от числа Рейнольдса, значение коэффициента поперечного сопротивления длинного цилиндра, равное:

$$C_w = \frac{W}{F \rho V^2 / 2} = 2A / Re \quad (5)$$

сопоставлялось с теоретическим значением, полученным по формуле Ламба:

$$C_{A_{u, \text{поз}}} = \frac{A_u \pi \mu V L}{(\pi d^2 / 4) \rho V^2 / 2} = 2A_u / Re \quad (6)$$

и с теоретическим значением коэффициента продольного сопротивления:

$$C_{A_{u, \text{прод}}} = 2A / Re = 8 / Re \quad (7)$$

Учитывая, что агрегат является двухфазным образованием, состоящим из магнетита и воды, которая заполняет пространство между частицами и движется вместе с магнетитом, гидродинамическая плотность его составляет 1900 – 2100 кг/м³, что соответствует содержанию твердого в магнитных фракциях (60–65%) при переработке магнетитсодержащих продуктов.

Разница скоростей осаждения при ламинарном режиме обтекания вытянутого агрегата и единичной сферической частицы может находиться в широком диапазоне значений в зависимости от напряженности магнитного поля.

В аппаратах, реализующих магнитно-гравитационный принцип разделения, используется сдвиговое действие центробежно-восходящего потока жидкости на сформированные ферромагнитные агрегаты. При разработке аналитической модели для учета сдвигового напряжения использовались результаты работы [11], в которой приводится оценка величины снижения коэффициента гидродинамического сопротивления при действии на ферромагнитный слой однородного магнитного поля (рис. 1) и сдвигового воздействия потока жидкости.

Величина межчастичной силы, действующей между ферромагнитными частицами во внешнем однородном магнитном поле зависит от величины угла между векторам индукции магнитного поля и радиус-вектором второй частицы, продольная и поперечная составляющие силы могут быть рассчитаны по формулам:

$$F_{\theta} = \frac{3\mu_0 |m|^2}{2\pi r^4} \sin \theta \cos \theta \quad (8)$$

$$F_r = \frac{3\mu_0 |m|^2}{4\pi r^4} (1 - 3 \cos^2 \theta) \quad (9)$$

а ее максимальная величина составляет значение согласно:

$$|F_{IM, \max}| = \frac{6\mu_0 m^2}{4\pi d_p^4} \quad (10)$$

Коэффициент гидродинамического сопротивления C_D при наложении внешнего поля и сдвигового потока отличается на величину D , зависящую от значения интенсивности магнитного поля:

$$D = \frac{C_D|_{B_0}}{C_D|_{B_0=0}} = 1 - 0,56A^{0,62} \quad (11)$$

где:

$$A = \frac{|F_{IM, \max}|}{(\rho_p - \rho_f) g V_p} \quad (12)$$

Приведенный выше математический аппарат использовался в аналитической модели течения ферромагнитной суспензии, которая реализована в трехмерной геометрии цилиндроконического корпуса аппарата высотой 1 м и диаметром 0,4 м (рис. 2, а).

Для проведения вычислительных экспериментов использовались следующие значения параметров: диаметр частиц твердой фазы (магнетита) составлял

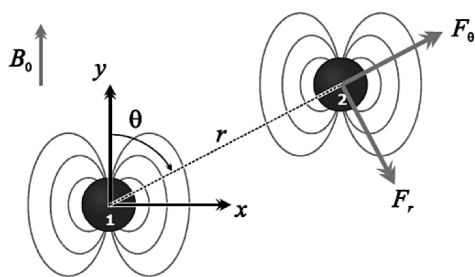


Рис. 1. Силы дипольного магнитного межчастичного взаимодействия в магнитном поле

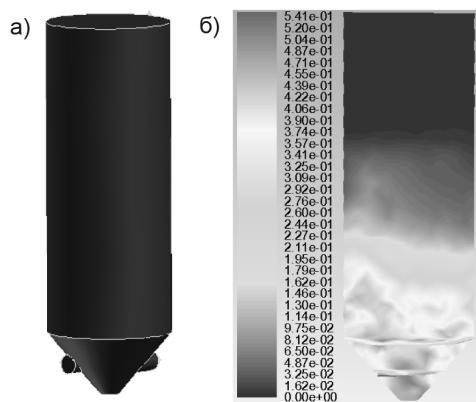


Рис. 2. Графические результаты вычислительного эксперимента: а) геометрия модели рабочего объема; б) распределение объемной концентрации твердой фазы внутри рабочего объема

концентрация ферромагнитных частиц в нижней части корпуса достигала значений $\alpha_s = 0,54$. Применение однородного магнитного поля позволило осушить магнитную стабилизацию оживленного слоя (MSFB) – устранить каналы прорыва жидкой фазы (области пониженного сопротивления слоя) и пузыри (области с пониженной концентрацией частиц), а также осуществить выравнивание вертикальных скоростей фильтрации жидкости.

Таким образом, разработанная аналитическая модель в первом приближении позволила исследовать течения ферромагнитной суспензии в рабочем объеме магнитно-гравитационного аппарата. Графические результаты моделирования показали наличие оживленного ферромагнитного слоя в нижней части аппарата с высокой объемной концентрацией, являющегося средой разделения. Использование данной модели для многофазных сред может стать основой для прогнозирования технологических показателей разделения в магнитно-гравитационных аппаратах различных конструкций, а также для их совершенствования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усачев П.А., Опалев А.С. Магнитно-гравитационное обогащение руд. – Апатиты: КНЦ РАН, 1993.
2. Кирко И.М., Филиппов М.В. Особенности взвешенного слоя ферромагнитных частиц в магнитном поле // Журнал технической физики. – 1960. – Т. 30, № 9. – С. 1081–1084.
3. Филиппов М.В. Взвешенный слой ферромагнитных частиц и действие на него магнитного поля // Прикладная магнитогидродинамика. – Рига, 1961. – Т. 12. – С. 215–236.
4. Rosensweig R.E. Magnetic stabilization of the state of uniform fluidization // Ind. Eng. Chem. Fundam. – 1979. – Vol. 18, N 3. – P. 260–269.
5. Rosensweig R.E. Fluidization: Hydrodynamic stabilization with a magnetic field // Science. – 1979. – Vol. 204. – P. 57–60.
6. Siegel J.H. Magnetized-fluidized beds. – Powder Technology, 64 (1991). – С. 1.
7. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, ч. I, 1987
8. Gidaspow D., Bezburuah R., Ding J. Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach / In Fluidization VII, Proceedings of the 7 th Engineering Foundation Conference on Fluidization, 1992. P. 75–82.
9. Вигдергауз В.Е., Шаденко А.А., Усов О.А., Чельшкина В.В. // Горный журнал. – 2003. – № 11. – С. 36–38.

0,0001 м, напряженность однородного магнитного поля равнялась 4 кА/м. Промывная вода подавалась в модель аппарата тангенциально по патрубкам, расположенными в нижней части конической части корпуса, при этом скорость восходящего потока составляла $V = 0,01$ м/с. На рис. 2, б приведены графические результаты вычислительного эксперимента над созданной аналитической моделью. На вертикальном срезе аппарата приведено распределение концентрации ферромагнитной фракции. Под действием вертикально ориентированного магнитного поля происходило формирование магнитостабилизированного оживленного слоя, при этом объемная

10. Кочин Н.Б., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. – М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 1963.

11. Goran N. Jovanovic, Thana Sornchamni, James E. Atwater, James R. Akse, Richard R. Wheeler Jr. Magnetically assisted liquid–solid fluidization in normal and microgravity conditions: experiment and theory. – Powder Technology, 148 (2004) P. 80–91. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Опалев Александр Сергеевич – кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, e-mail: opalevAS@rambler.ru,

Бирюков Валерий Валентинович – научный сотрудник,
e-mail: birukov@goi.kolasc.net.ru,

Новикова Ирина Викторовна – техник I кат.,
e-mail: novikova@goi.kolasc.net.ru,

Горный институт Кольского научного центра РАН.

UDC 622.778.2 : 519.711.2

FORMATION OF MAGNETIZED STABILIZED FLUIDIZED BED IN THE WORKING VOLUME OF MAGNETIC-GRAVITY SEPARATOR

Opalev A.S.¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
e-mail: opalevAS@rambler.ru,

Birukov V.V.¹, Researcher, e-mail: birukov@goi.kolasc.net.ru,

Novikova I.V.¹, Technician I Category, e-mail: novikova@goi.kolasc.net.ru,

¹ Mining Institute of Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,
184209, Apatity, Russia.

The theoretical basis of the formation of magnetized stabilized fluidized bed (MSFB) taking into account the magnetic interactions between the ferromagnetic particles are considered. Graphic results of simulation of the behavior of particles with different physical properties in the working volume of magnetic-gravity separator are presented.

Key words: magnetized stabilized fluidized bed (MSFB), magnetic interpartical interaction, magnetic-gravity separation, the multiphase fluid, dividing volume, computer simulation.

REFERENCES

1. Usachev P.A., Opalev A.S. *Magnitno-gravitatsionnoe obogashchenie rud* (Magnetic–gravitational concentration of ore), Apatity, KNTs RAN, 1993.

2. Kirko I.M., Filippov M.V. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 1960, vol. 30, no 9, pp. 1081–1084.

3. Filippov M.V. *Prikladnaya magnitogidrodinamika*. Riga, 1961, vol. 12, pp. 215–236.

4. Rosensweig R.E. Magnetic stabilization of the state of uniform fluidization. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 1979. Vol. 18, N 3. P. 260–269.

5. Rosensweig R.E. Fluidization: Hydrodynamic stabilization with a magnetic field. *Science*. 1979. Vol. 204. P. 57–60.

6. Siegel J.H. Magnetized-fluidized beds. *Powder Technology*, 64 (1991), pp. 1.

7. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* (Dynamics of multiphase media), Moscow, Nauka, part I, 1987.

8. Gidaspow D., Bezburuah R., Ding J. Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach. *In Fluidization VII, Proceedings of the 7 th Engineering Foundation Conference on Fluidization*, 1992. P. 75–82.

9. Vigdergauz V.E., Shchadenko A.A., Usov O.A., Chelyshkina V.V. *Gornyy zhurnal*. 2003, no 11, pp. 36–38.

10. Kochin N.B., Kibel' I.A., Roze N.V. *Teoreticheskaya gidromekhanika* (Theoretical hydromechanics), Moscow, Izd-vo fiz.-mat. literature, 1963.

11. Goran N. Jovanovic, Thana Sornchamni, James E. Atwater, James R. Akse, Richard R. Wheeler Jr. Magnetically assisted liquid–solid fluidization in normal and microgravity conditions: experiment and theory. *Powder Technology*, 148 (2004) P. 80–91.