

УДК 622.7:519.711.2

А.С. Опалев, В.В. Бирюков, И.В. Буренина

**ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА
ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА
МАГНИТНОГРАВИТАЦИОННОЙ СЕПАРАЦИИ***

Рассмотрена возможность использования компьютерного моделирования процесса магнитно-гравитационной сепарации. Предложен метод учета магнитных взаимодействий между ферромагнитными частицами в магнитно – стабилизированном ожигенном слое (MSFB). Представлены графические результаты моделирования.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, CFD-метод, магнитное межчастичное взаимодействие, магнитно-гравитационная сепарация, многофазное течение, разделительный объем.

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 закрученным восходящим потоком жидкости частиц исходного материала через ожигенный слой магнитноагрегированной суспензии. При этом разделяемые минеральные частицы в зависимости от их физических свойств – крупности, формы, 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 процесса разделения минеральных комплексов в магнитно-гравитационном аппарате с применением одного из компонентов системы инженерного анализа – программного комплекса ANSYS – Fluent (CFD).

Компонентами CFD-модели являлись расчетная сетка рассматриваемой геометрии, граничные условия и физические свойства материалов, к-ε модель турбулентности, а также параметры численного решения системы уравнений Навье-Стокса и Эйлера (рис. 1).

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.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (ГК № 16.515.11.5038).



Рис. 1. Компоненты аналитической CFD-модели гидродинамических процессов разделения минеральных компонентов

Уравнение сохранения импульса для s -й твердой фазы:

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

где ρ – плотность фазы; \bar{v}_s, \bar{v}_l – скорости соответственно твердой и жидкой фазы; p_s – давление s -й 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; $\tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18\mu}$ – 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 $a_l > 0,8$, то коэффициент взаимодействия между твердой и жидкой фазами K_{sl} имеет следующую форму:

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

$$C_D = \frac{24}{a_l Re_s} [1 + 0,15(a_l Re_s)^{0,687}] -$$

коэффициент гидродинамического сопротивления.

В случае, если $a_l \leq 0,8$, 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:

$$C_{A_{и.пос}} = \frac{A_{и} \pi \mu VL}{(\pi d^2 / 4) \rho V^2 / 2} = 2A_{и} / Re, \quad (6)$$

и с теоретическим значением коэффициента продольного сопротивления:

$$C_{A_{и.прод.}} = 2A / Re = 8 / Re. \quad (7)$$

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 магнетитосодержащих 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 действие восходящего закрученного потока жидкости, который создает сдвиговое воздействие 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 внешнего однородного магнитного поля (рис. 2) и сдвигового воздействия потока жидкости.

Величина межчастичной силы, действующей между ферромагнитными частицами во внешнем однородном магнитном поле зависит от величины угла θ между

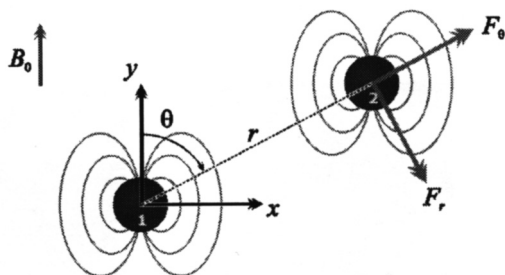


Рис. 2. Силы дипольного магнитного межчастичного взаимодействия во внешнем магнитном поле

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:

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

Коэффициент гидродинамического сопротивления CD 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:

$$A = \frac{|F_{M, \max}|}{(\rho_p - \rho_f)gV_p}. \quad (12)$$

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. 3, а).

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

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. 3, 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 магнито-стабилизированного оживленного слоя, при этом объемная концентрация ферромагнитных частиц в в нижней части

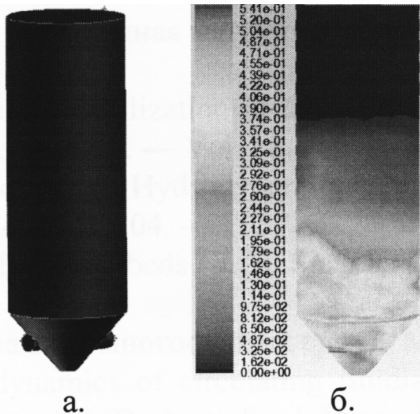



Рис. 3. Графические результаты вычислительного эксперимента: а – геометрия модели рабочего объема; б – распределение объемной концентрации твердой фазы внутри рабочего объема

корпуса достигала значений $\alpha_s = 0,54$. Применение однородного магнитного поля позволило осуществить 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 // Журн. техн. физики. – 1960. – Т. 30, № 9. – С. 1081–1084.
3. Филиппов М.В. Взвешенный слой ферромагнитных частиц и действие на него магнитного поля // Прикладная магнетогидродинамика. – 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, № 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. Magnetized-fluidized beds / J.H. Siegel. – Powder Technology, 64 (1991). – P. 1.
7. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, ч. 1, 1987.
8. Gidaspo D. Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach. / D. Gidaspo, R. Bezburuah, J. Ding // In Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization, 1992. P. 75–82.
9. Вигдергауз В.Е., Щаденко А.А., Усов О.А., Чельшукина В.В. Горный журнал 2003, № 11. – С. 36–38.
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. 

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,

Буренина Ирина Викторовна – инженер, e-mail: bur@goi.kolasc.net.ru,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук.



APPLICATION OF THE ENGINEERING ANALYSIS SYSTEMS FOR DEVELOPMENT OF SIMULATION PROCESS OF MAGNETIC-GRAVITY SEPARATION

Opalev A.S., Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: opalevAS@rambler.ru,
Biryukov V.V., Researcher, e-mail: birukov@goi.kolasc.net.ru,
Burenina I.V., Engineer, e-mail: bur@goi.kolasc.net.ru.
Mining Institute, Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences.

The developed analytical model allows studying ferromagnetic suspension flow in a magnetic gravity separator at a first approximation. The modeling plots show that the liquefied ferromagnetic layer, which is a separation medium, with high concentration by volume is present at the separator bottom. The described model can be used to make predictive estimates of separation of multiphase media in the magnetic gravity separators of various design, and for upgrading such separators.

Key words: computer simulation, CFD-method, magnetic interpartical interaction, magnetic-gravity separation, the multiphase fluid, dividing volume.

REFERENCES

1. Usachev P.A., Opalev A.S., Magnetic Gravity Ore Preparation. Apatity: Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 1993.
2. Kirko I.M., Filippov M.V., Features of the Suspended Floc Layer of Ferromagnetic Particles in the Magnetic Field, Zhurnal tekhnicheskoi fiziki, 1960, Vol. 30, No. 9, pp. 1081–1084.
3. Filippov M.V., Suspended Floc Layer of Ferromagnetic Particles and the Magnetic Field Influence, Prikladnaya magnitogidrodinamika, 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, № 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. Magnetized-fluidized beds / J.H. Siegel. – Powder Technology, 64 (1991). – P. 1.
7. Nigmatulin R.I., Dynamics of Multiphase Media. Part I. Moscow: Nauka, 1987.
8. Gidaspow D. Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach. / D. Gidaspow, R. Bezburuah, J. Ding // In Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization, 1992. P. 75–82.
9. Vigdergauz V.E., Shchadenko A.A., Usov O.A., Chelyshkina V.V., Gorny zhurnal, 2003, No. 11, pp. 36–38.
10. Kochin N.B., Kibel I.A., Roze N.V., Theoretical Hydromechanics. Moscow: Fiz.-Mat. Lit., 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.



**РУКОПИСИ,
ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»**

РОЛЬ ВНЕШНЕЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ЭКОНОМИКЕ РОССИИ (№ 1000/02-14 от 12.12.13, 8 с.)

Бобков А.Л., кандидат технических наук, доцент,
Калашникова И.А., доцент,
Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, <http://www.rea.ru>

ROLE OF EXTERNAL ECONOMIC ACTIVITY IN ECONOMY OF RUSSIA

Bobkov A.L., Kalashnikova I.A.