

А. Н. Корчевский, инж.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУХОЙ СЕПАРАЦИИ МАТЕРИАЛОВ. НАСТРОЙКА МОДЕЛИ

Виконано аналіз процесу сепарації лома кольорових металів методом пневмовібраційного збагачення з використанням лабораторного зразка сепаратора та метода дискретних елементів. Встановлені режимні параметри процесу. Показано, що процес має високу селективність та ефективність розділення.

Ключові слова: сепарація, кольорові метали, комп'ютерне моделювання, дискретні елементи, ефективність.

Выполнен анализ процесса сепарации лома цветных металлов методом пневмовибрационного обогащения с использованием лабораторного образца сепаратора и метода дискретных элементов. Установлены режимные параметры процесса. Показано, что процесс имеет высокую селективность и эффективность разделения.

Ключевые слова: сепарация, цветные металлы, компьютерное моделирование, дискретные элементы, эффективность.

В отечественной и особенно зарубежной практике наблюдается тенденция использования пневматических методов для разделения сыпучих материалов. Разделяемые зерна имеют разную форму, плотность, коэффициент трения и другие свойства, на различии в которых и основан упомянутый выше способ разделения, привлекающий внимание многих специалистов [1-3]. Для этих целей используются в основном сухие методы и пневматические сепараторы различных конструкций [4].

Исследования направлены на изыскание новых способов разделения сыпучих материалов по указанным признакам и создание новых наиболее эффективных машин. Анализ исследовательских работ в этой области позволил выделить следующие группы машин: вибрационные, пневматические, пневмовибрационные, ферромагнитные.

В вибрационных сепараторах разделение сыпучей смеси происходит под действием вибрации за счет разницы в шероховатости частиц, что вызывает их перемещение по различным траекториям. Недостатком такого типа машин является низкое качество сепарации, обусловленное движением материала в общем потоке, и малая производительность.

В пневматических сепараторах материал разделяется за счет различной траектории движения зерен в воздушном потоке. К недостаткам пневматических сепараторов следует отнести низкую эффективность разделения, малую производительность, сложность настройки и регулирования в процессе разделения.

Пневмовибрационные сепараторы можно разделить на два подвида: прямоточные и противоточные, которые представляют особый интерес. Здесь

под действием вибрации и восходящего потока воздуха частицы переходят в псевдооживленное состояние и расслаиваются по высоте слоя на тяжелую и легкую фракции.

В семидесятые годы прошлого века в отечественной практике применялись пневмовибрационные сепараторы типа СП-12, СП-6, СПБ-100М, которые относятся к машинам прямоточного типа [5].

В зарубежной практике для сухого обогащения применяются сепараторы “Super Air Flo” (США) и сепараторы фирм «Ведаг» и «Гумбольдт» (Европа) [6]. К недостаткам этих машин можно отнести низкую эффективность разделения зерен из-за взаимного засорения продуктов, которое вызвано движением материала к месту разгрузки в общем потоке. Противоточные сепараторы обеспечивают более высокую точность разделения по сравнению с прямоточными.

Процессы распределения частиц твердой фазы при пневмовибрационной сепарации представляют большую трудность для исследования, т.к. они динамичны, находятся под влиянием большого количества факторов и происходят в маленьком масштабе. Одним из вариантов разрешения этой проблемы является численное моделирование, которое сочетает в себе динамику, точность и рассмотрение широкого спектра деталей [7]. Разработана компьютерная модель для моделирования кинетики взаимодействия фаз, которая базируется на дискретных элементах [8].

Целью настоящей работы является моделирование гравитационной сепарации многокомпонентного лома цветных металлов с использованием компьютерного моделирования пневмовибрационного метода.

Рассмотрим пару минеральных частиц, схема взаимодействия которых представлена на рис. 1.

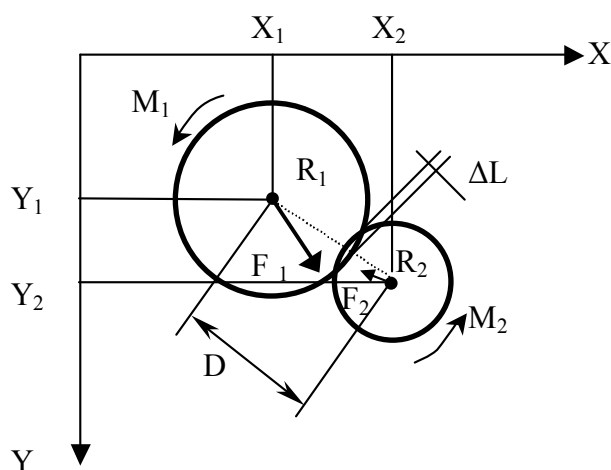


Рисунок 1 – Схематичное изображение пары взаимодействующих частиц

Частицы имеют шарообразную форму с радиусами R_1 и R_2 . Любая частица движется под действием силы (F_1 или F_2) и вращается в соответствии с законом Ньютона в прямоугольной системе координат X - Y , если она ускоряется моментами M_1 и M_2 . Движение частиц рассматривается в дискретные периоды

времени. В компьютерной реализации эти периоды моделируются как циклы. Координаты центров тяжести X_1, Y_1 и X_2, Y_2 , скорости V_1 и V_2 , и силы являются постоянными и рассчитываются на каждом цикле. Все частицы движутся под действием результирующего ускорения G , возникающего от действия сил тяжести, Архимедовой (расположения) силы, демпфирующей силы или силы сопротивления среды, а также от влияния смежных соседей [9, 10]. В результате рассчитывается приращение скорости на каждом цикле в соответствии с формулой:

$$\Delta V = G \cdot \Delta t - k_V \cdot V_y, \quad (1)$$

где ΔV - приращение скорости, м/с; G - ускорение, м/с²; Δt – время приращения на цикле, с; k_V – сопротивление среды (коэффициент демпфирования).

Затем частицы движутся к следующей позиции, соответственно приращению компонентов скорости и времени:

$$X = X + \Delta V_x \cdot \Delta t, \quad (2)$$

$$Y = Y + \Delta V_y \cdot \Delta t. \quad (3)$$

Здесь X и Y - новые горизонтальные и вертикальные координаты частицы, м; ΔV_x и ΔV_y – приращения горизонтальной и вертикальной скорости, м/с.

После перемещения частицы в новое положение за один цикл расстояние D между смежными частицами должно быть изменено и нахлестка ΔL рассчитывается. Затем приращение силы рассчитывается как:

$$\Delta F = k \cdot \Delta l - k_F \cdot V - k_T \cdot F, \quad (4)$$

где ΔF – приращение силы, н; k – коэффициент жесткости, н/м; k_T и k_F - коэффициент трения и коэффициент необратимости (потери энергии в течение взаимодействия); F – результирующая сила, н.

В течение каждого цикла смежные частицы проверяются на условия когезии и адгезии. Если частицы имеют приближение одна к другой на критическое расстояние, они слипаются между собой (две или несколько), образуя комплекс. Одновременно проверяются силы адгезии (когезии). Если они достигают определенных пределов, слипшиеся комплексы разрушаются. Введено три предела для сил. А именно, слипшиеся частицы должны разъединиться, если они были сжаты в нормальном направлении на величину большую, чем предел сжатия L_s , или были срезаны в тангенциальном направлении относительно друг друга больше, чем предел сдвига L_s , или изогнуты относительно соединения более, чем предел коробления L_b .

Модель позволяет получать правдивое динамическое поведение частиц и исследовать влияние различных параметров при обогащении и обезвоживании. Компьютерные коды развиты в среде Дельфи 3. Моделирование поведения

группы зерен, состоящей из сотни взаимодействующих между собой частиц, в течение сотен тысяч циклов может быть закончено за приемлемый период времени благодаря средствам объектного программирования. В результате работы программы можно получить графические и текстовые файлы для анализа.

Для описания свойств частиц и параметров их взаимодействия вводятся следующие величины: плотность материала частиц; горизонтальное ускорение; вертикальное ускорение; угловое (крутящее) ускорение; коэффициент трения; коэффициент вязкостного сопротивления (внешнего); коэффициент вязкостного сопротивления (внутреннего); коэффициент крутящего сопротивления (внешнего); коэффициент крутящего сопротивления (внутреннего); коэффициент нормальной жесткости; коэффициент касательной жесткости; коэффициент изгибной жесткости; режим контактирования частиц; режим адгезии частиц; дистанция, при которой уже возможно адгезионное взаимодействие.

В лаборатории кафедры «Обогащение полезных ископаемых» Донецкого национального технического университета разработана конструкция лабораторного пневмовибрационного сепаратора с противоточным движением продуктов разделения [11]. Принципиальная схема конструкции и анализ сил, действующих на частицы материала, представлены в работе [12]. В ходе натуральных экспериментов была подготовлена проба дробленого лома цветных металлов крупностью 1.25-5 мм [11]. В состав дробленого лома цветных металлов входит алюминий и резиновая изоляция плотностью 2.72 и 1.2 т/м³, соответственно. Результаты фракционного анализа исходного материала свидетельствуют о том, что содержание алюминия составляет 82.7, а резиновой изоляции 17.3%.

Для детального исследования процесса сепарации использована упомянутая выше модель на базе дискретных элементов. Первоначальное состояние модели показано на рис. 2.

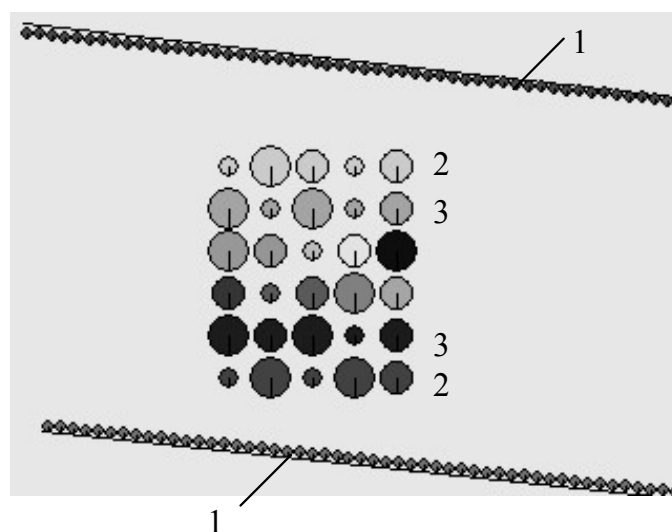


Рисунок 2 – Исходное состояние модели перед началом моделирования:
1 – стенки сепаратора, 2 – слой частиц из резины, 3 – слой частиц из алюминия
(в средних слоях частицы резины и алюминия расположены случайным образом)

В модели учтены свойства разделяемых материалов и задано их примерное количественное соотношение. Кроме того, стенки сепаратора имеют характерные для них свойства и режим движения, а также угол и направление наклона. Подача воздуха снизу учтена путем задания соответствующей скорости частиц. На рис. 3 показано промежуточное положение разделяемых частиц и по истечении 2 000 000 циклов счета. Один цикл времени счета в модели соответствует 5×10^{-6} с натурального времени.

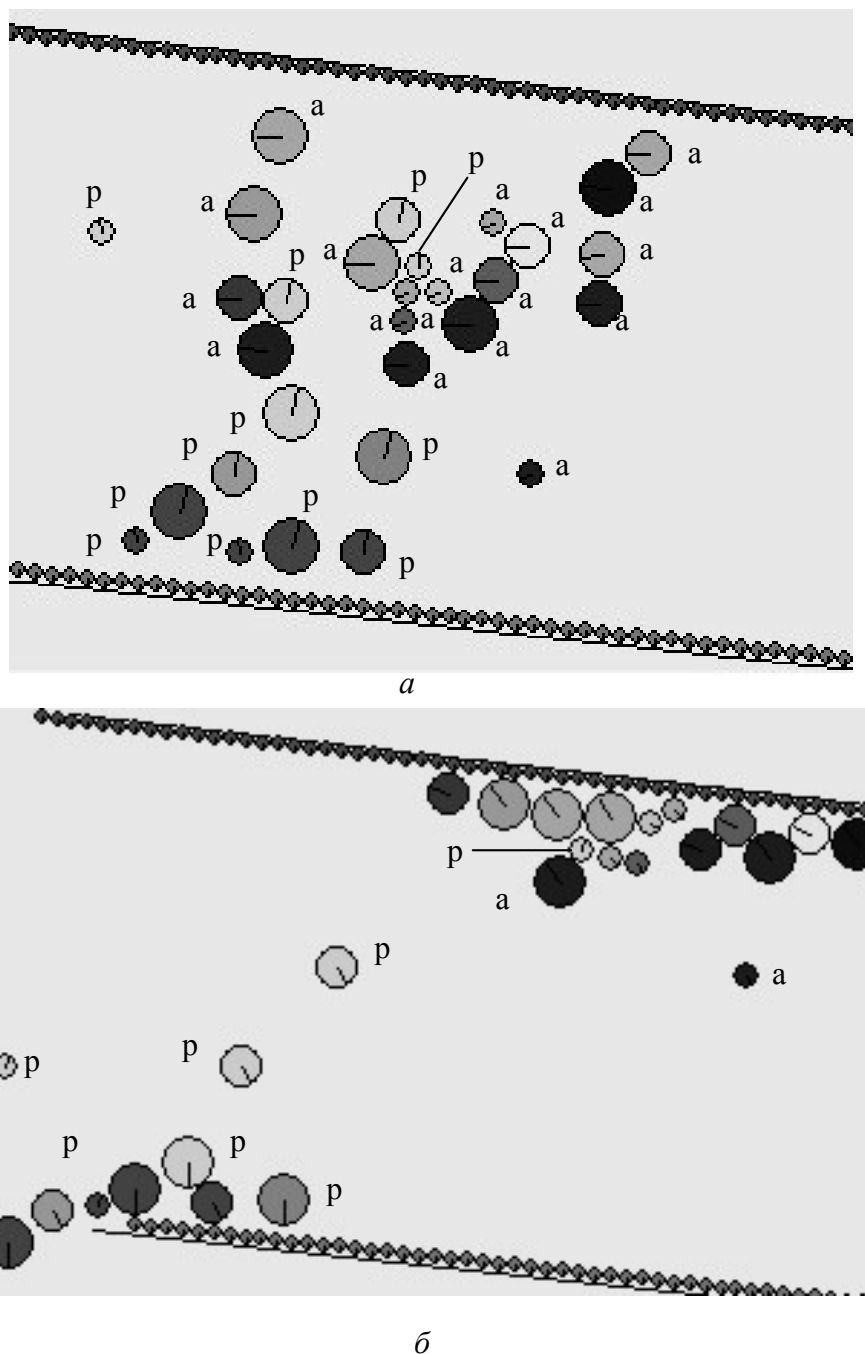


Рисунок 3 – Графическое представление результатов моделирования:
а – после 800 000 циклов счета, б – после 2 000 000
(буквами «а» и «р» обозначены частицы алюминия и резины)

Как следует из представленных графических фрагментов, частицы не только витают в потоке воздуха, но и вращаются, сталкиваясь друг с другом и стенками сепаратора, что видно по изменению положения их радиуса.

В ходе моделирования отдельные зерна помечены цветом и имеют индивидуальный номер. При наведении курсора на частицу на дисплее высвечивается ее номер, соответствующий номеру в файле исходных данных. Кроме того, в текстовом файле указываются координаты центра тяжести каждого зерна, по которым можно определить его местоположение в данный момент времени и траекторию движения. Поэтому моделирование с использованием дискретных элементов позволяет анализировать тонкие процессы взаимодействия частиц при разных режимах скоростей подачи воздуха и вибрации стенок сепаратора, которые происходят в очень маленькие промежутки времени.

В ходе анализа можно определить, что на цикле счета № 800 000 процесс разделения материала еще не закончился, т.к. часть зерен резины увлечена частицами алюминия (см. рис. 3, а).

На цикле счета № 2 000 000 от начала эксперимента, процесс разделения фактически завершился. Среди зерен алюминия осталась увлеченная и защемленная ими при движении частица резины, которая не попала в тяжелый продукт – отходы. Эта частица маленького диаметра загрязняет концентрат, разгружающийся через порог в правой части верхней стенки сепаратора. Одна мелкая частица алюминия в правой части объема сепаратора и две средних размеров частицы резины еще движутся в его средней части (см. рис. 3, б). Но в целом процесс закончился.

Результаты некоторых натуральных экспериментов – состав и качество концентрата, приведенные в таблице, подтверждают высокую селективность разделения зерен в лабораторном пневмовибрационном сепараторе при выбранном на основании предварительного компьютерного моделирования режиме.

№ оп.	Выход, %	Содержание, %		Извлечение алюминия, %	Эффективность, %
		алюминия	резины		
1	83,82	98,15	0,85	99,43	90,1
2	82,88	99,3	0,7	99,26	94,5
3	80,99	98,14	1,86	99,46	96
4	81,87	99,5	0,5	96,45	97,4
5	82,07	98,71	1,29	97,91	97,7

Из приведенных данных следует, что моделирование сложных процессов сепарации материалов с использованием метода дискретных элементов позволяет исследовать тонкие процессы взаимодействия зерен за малые промежутки времени и прогнозировать результаты разделения.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение взаимодействия зерен в процессах обогащения.

Список литературы

1. Новая технология сухого обогащения // Российский уголь. – 2003. – №1. – С. 28-29.
2. **Анисимов Н.Т., Голубничий В.Г., Багмут З.В., Сологуб В.В.** Отработка технологии для индивидуальных обогатительных установок // Уголь Украины. – 2003. - №3. – С. 40-41.
3. **Кофанов А.С., Чумак В.Ф., Уманец А.С., Ефремов Ю.И.** Обогащение полезных ископаемых пневмовибрационным способом // Збагачення корисних копалин. – Дніпропетровськ. – 2003. – С. 96-101.
4. **В.Д. Анохин, Д.А. Плинс, В.Н. Монахов.** Вибрационные сепараторы. М.: Недра, 1991. – 156 с.
5. Оборудование для обогащения угля: Спр. пособие / Под ред Б.Ф. Братченко. М.: Недра. – 1979. – 335 с.
6. **Р.О. Берт.** Технология гравитационного обогащения. М.: Недра. – 1990. – 574 с.
7. **Cundall P.A., Strack O.D.L.** A discrete numerical Model for granular assemblies, *Geotechnique*, 29, # 1, pp. 47-65 (1974).
8. **Звягильский Е.Л.** Изучение кинетики обрушения толщи над горизонтальными выработками мелкого заложения // Проблемы горного давления. - Донецк. – 1999. - № 2. – С. 17-29.
9. **Гарковенко Е.Е., Назимко Е.И., Самойлов А.И., Папушин Ю.Л.** Особенности флотации и обезвоживания тонкодисперсных углесодержащих материалов. Донецк: Норд-Пресс. – 2002. – 266 с.
10. **Е.И. Назимко, И.Н. Друц.** Исследование кинетики взаимодействия фаз в динамической среде при обогащении минералов. // Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ. – 2004. - №1. - С.336-339.
11. Исследовать возможность гравитационной сепарации многокомпонентного лома с применением вибро-пневматического метода. Отчет о НИР (заключ.). Х/т № 86-82, № Гр. 01860030623, И. № 02870067323. – Донецк – 1987. Рук. Сухин Н.В.
12. **Сухин Н.В., Корчевский А.Н., Назимко Е.И.** Применение вибрационного пневматического сепаратора при разделении лома цветных металлов // Обогащение полезных ископаемых. - Днепропетровск. – 2004. - №20 (61) . – С. 77-82.

*Поступила в редколлегию 20.04.2005 г.
Рекомендована к публикации д.т.н. А.Д. Полуляхом*