УДК 621.928.622.273, 622.44
DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-1-44-51

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КЛАССИФИКАЦИИ ГЛИНОЗЕМОВ В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКАХ ФРИКЦИОННЫХ АППАРАТОВ

MATHEMATICAL MODELING OF ALUMINA CLASSIFICATION TECHNOLOGY IN AERODYNAMIC FLOW OF FRICTION DEVICES

В. Я. Потапов,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
2c1@inbox.ru

V. Potapov,
Ural State Mining University, Yekaterinburg

В. Н. Макаров,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
gmf.gm@m.ursmu.ru

V. Makarov,
Ural State Mining University, Yekaterinburg

В. В. Потапов,
Уральский государственный горный университет, г . Екатеринбург
2c1@inbox.ru

V. Potapov,
Ural State Mining University, Yekaterinburg

Н. В. Макаров,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
gmf.gm@m.ursmu.ru

N. Makarov,
Ural State Mining University, Yekaterinburg

П. М. Анохин,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
panokhin1@mail.ru

P. Anokhin,
Ural State Mining University, Yekaterinburg

© В. Я. Потапов, В. Н. Макаров, В. В. Потапов, Н. В. Макаров, П. М. Анохин, 2017

Статья посвящена исследованию процесса классификации многокомпонентного исходного сырья направленным аэродинамическим потоком воздуха в барабанно-полочном фрикционном сепараторе с целью повышения его эффективности и качества готового продукта в технологии производства строительных материалов и цемента.

С использованием аэродинамики тел произвольной формы в направленном воздушном потоке построена математическая модель классификации частиц компонентов исходного сырья в зависимости от их физических свойств и параметров воздушного потока.

Получены уравнения расчета геометрических параметров фрикционного барабанно-полочного сепаратора с устройством создания направленного аэродинамического потока воздуха в зависимости от формы, размеров, свойств частиц исходного сырья и параметров потока воздуха, обеспечивающих максимальное качество стратификации исходного сырья, и как результат – повышение эффективности производства и качества строительных материалов и огнеупоров.

Подтверждена достаточная сходимость экспериментальных и расчетных данных.

Разработанная математическая модель и результаты экспериментальных исследований подтвердили высокую эффективность применения барабанно-полочного фрикционного сепаратора с устройством создания направленного аэродинамического потока воздуха для повышения качества строительных материалов и цемента применительно к исходному сырью, компоненты которого отличаются достаточной «парусностью»

Ключевые слова: *скорость витания; «парусность»; физические характеристики; фрикционный сепаратор; аэродинамический эффект; математическое моделирование; глинозем; строительные материалы; барабанно-полочный сепаратор; цемент*

The article investigates the classification of a multi-feedstock process flow direction of the air blown into the drum-separator, a tray friction in order to increase its efficiency and quality of the finished product in the production of building materials and cement technology.

Using aerodynamic bodies of arbitrary shape in a directed air flow, a mathematical classification model of feedstock component particles depending on their physical characteristics and airflow parameters is developed.

The equations for calculating the geometrical parameter friction drum shelf separator device, creating directional aerodynamic air flow depending on the shape, size, properties of the feedstock particles and air flow parameters which maximize the quality of the feedstock stratification and as a result, an increase in production efficiency and the quality of building materials and the refractory are obtained.

The sufficient convergence of the experimental and calculated data is proved.

The developed mathematical model and the results of experimental studies have confirmed the high efficiency of the separator drum shelving friction with the aerodynamic device, which create directional airflow to improve the quality of building materials and cement with respect to the feedstock, the components of which are different enough in «sailness»

Key words: *speed of wandering; «sailing»; physical characteristics; friction separator; fan effect; math modeling; alumina; construction materials; drum-shelf separator; cement*

Обеспечение конкурентоспособности предприятий строительной индустрии в глобальном экономическом пространстве невозможно без ускорения темпов реконструкции действующих и создания новых производств с учетом передовых достижений науки, внедрения современного высокотехнологичного оборудования. В значительной степени это касается технологических переделов подготовки, классификации исходного сырья, существенно влияющих на качество конечного продукта: строительных материалов и огнеупоров.

В зависимости от технологической и производственной структуры подготовка и классификация компонентов исходных смесей в строительной индустрии отличается высокой энергоемкостью и недостаточной эффективностью [5; 6].

Одним из путей повышения эффективности классификации является создание менее энергоемких разделительных аппаратов и совершенствование структуры и технологии подготовки и разделения исходного сырья [1; 5].

При разработке и проектировании аппаратов необходимо учитывать кон-

структивные особенности их структурных единиц, способствующих качественному разделению и классификации исходного сырья по физическим характеристикам. С позиции совершенствования разделения и классификации исходного сырья наиболее перспективным является барабанно-полочный фрикционный сепаратор с устройством создания направленного аэродинамического потока воздуха (БПФСА) [3; 5].

БПФСА представляет собой совокупность четырех структурированных устройств, каждое из которых предназначено для разделения частиц исходного материала по соответствующим структуре признакам (рис. 1) [1; 2; 4].

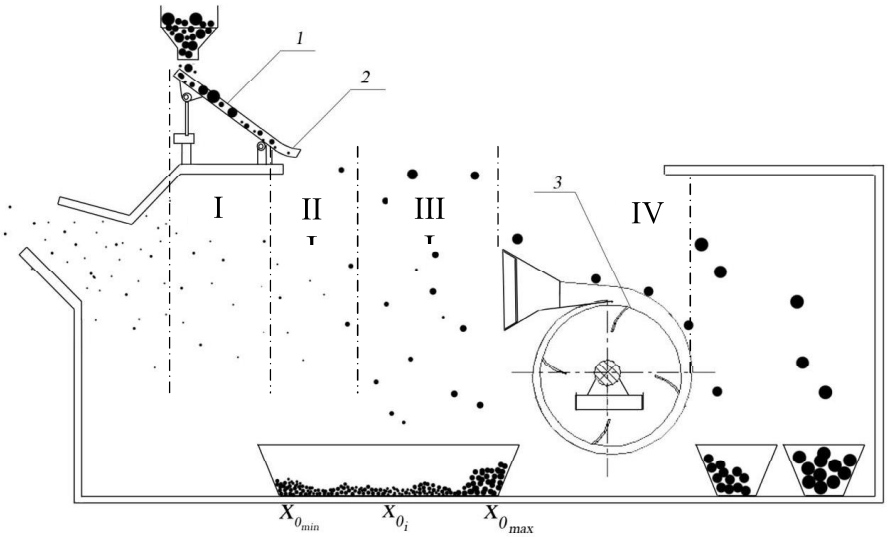

Рис. 1. Принципиальная схема сепаратора БПФСА

Fig. 1. Schematic diagram of the separator BPFSA

В соответствии с четырьмя структурированными устройствами в БПФСА выделяются четыре фазы движения материала, соответствующие четырём этапам его классификации (рис. 1; 2).

I – движение материала по наклонной полке, где происходит формирование потока перед вводом в камеру сепаратора.

II – фаза-распределение сепарируемого материала по граничащим друг с другом потокам, с преобладанием в каждом однородных по форме и плотности частиц, происходящее в воздушной камере с момента отрыва частиц от нижней кромки наклонной полки.

III – фаза-разделение компонентов под действием потока воздуха, создаваемого радиальными вентиляторами.

IV – фаза-разделение компонентов на поверхности вращающегося барабана, на торцах которого установлены указанные радиальные вентиляторы для обеспечения целенаправленного потока воздуха.

Наклонная полка 1 подготавливает к разделению частицы с различными коэффициентами трения. Чем меньше коэффициент трения частицы о плоскость, тем выше скорость выхода её с полки. Наклон плоскости должен обеспечивать движение частиц без остановки, что накладывает определенные ограничения на угол β. Угол наклона полки β должен быть больше наибольшего из возможных значений углов трения для частиц обогащаемого материала с различным содержанием полезного компонента.

Криволинейный трамплин 2 обеспечивает вторую стадию подготовки частиц с различными коэффициентами трения к разделению. Сила трения на этом участке меняется в зависимости от места нахождения частицы, так как в разных точках

вогнутой траектории нормальное давление частицы на криволинейную поверхность различное. В результате при выходе частиц на участок свободного полета они имеют существенно различные скорости, а вылет частиц происходит по настильным траекториям. Таким образом, образуется веер разделения, благодаря которому возможно формирование продуктов частиц с различным содержанием полезного компонента.

На третьей стадии разделение исходных материалов происходит за счет воздействия направленного аэродинамического потока воздуха, создаваемого радиальными вентиляторами, встроенными в торцы вращающегося барабана.

Для частиц средней части веера в БПФСА предусмотрена четвёртая стадия разделения. На обечайке вращающегося барабана 3 разделение частиц исходного сырья происходит вследствие различия их коэффициентов восстановления при ударе. Поскольку поверхность обечайки вращающегося барабана имеет шероховатость, то в точке контакта на частицу, кроме нормальной реакции, действует еще и сила трения, направленная в сторону, противоположную относительной скорости частицы. В зависимости от направления этой силы отскок частицы может происходить как в сторону вращения барабана, так и в противоположную сторону.

В силу отсутствия в литературе аналитических материалов по изучению процесса стратификации многокомпонентного исходного сырья путем его взаимодействия с направленным потоком воздуха, наиболее актуально исследовать аэродинамику процесса движения двухфазной среды для повышения эффективности разделения твердых компонентов в воздушном потоке.

В статье представлена математическая модель аэродинамики многокомпонентного исходного сырья для изучения процесса его классификации на третьей фазе движения в БПФСА. Решение этой задачи позволит повысить качество исходного сырья за счет эффективного использования влияния физических свойств компонентов, на величину действующих на них сил аэродинамического сопротивления, Стокса, Архимеда и Магнуса.

Свободный полет частицы многокомпонентного исходного сырья на третьей стадии его движения в БПФСА начинается из точки В со скоростью V_{B_i} (рис. 2). Скорость движения зависит от физических свойств частиц: их плотности, состояния поверхности, размеров, формы, петрографического состава, взаимного трения и столкновения частиц между собой и со стенками аппарата. Таким образом, в точке В, i-я частица будет иметь соответствующую ей скорость V_{B_i}.

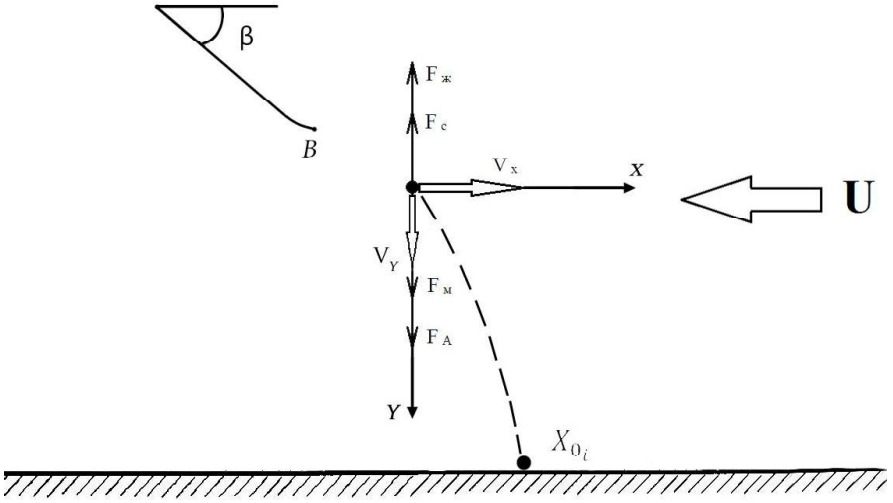

Рис. 2. Схема движения частицы и действующих на нее сил на третьей фазе движения в БПФСА

Fig. 2. Diagram of the particle and forces acting on it in the third phase of the movement in BPFSA

При движении i-й частицы в направлении оси *ox* на нее действует сила лобового сопротивления $F_л^i$, обусловленная как скоростью собственного движения частицы, так и скоростью направленного аэродинамического потока воздуха.

Уравнение движения i-й частицы компонентов исходного сырья в проекции на ось *ox*, совпадающую с направлением аэродинамического потока воздуха от действия вентиляторов, запишем в виде

$$F_л^i = m_i \frac{\partial V_{x_i}}{\partial t} = k_i \pi r_i^2 \rho_в (V_{x_i} - U)^2, \quad (1)$$

где $к_i$ – коэффициент лобового сопротивления i-й частицы;

ri – радиус i-й частицы, м;

$\rho_в$ – плотность воздуха, кг/м^3;

V_{x_i} – составляющая скорости i-й частицы, м/с;

U – скорость потока воздуха, м/с;

$m_i = \frac{4}{3}\pi r_i^3 \rho_i$ – масса i-й частицы, кг;

t – время действия ускорения, с;

ρ_i – плотность i-й частицы, кг/м^3.

Уравнение движения i-й частицы в проекции на ось *oy* имеет вид

$$m_i \frac{\partial V_{y_i}}{\partial t} = -F_ж^i + F_А^i - F_С^i + F_м^i, \quad (2)$$

где $F_ж^i = k_i \pi r_i^2 \rho_в (V_{x_i} + U)^2$ – сила Жуковского, направленная вертикально вверх, действующая на i-ю частицу;

$F_А^i = \frac{4}{3}\pi r_i^3 (\rho_i - \rho_в) g$ – сила Архимеда, направленная вниз, действующая на i-ю частицу;

$F_С^i = \varphi_i \pi \eta r_i V_{y_i} F_С^i = \varphi_i \pi \eta r_i V_{y_i}$ – сила сопротивления Стокса, направленная вниз и обусловленная вязкостью воздуха и физическими свойствами компонентов исходного сырья;

$F_м^i = \pi \rho_i r_i^3 \Omega_i (V_{x_i} + U)$ – сила Магнуса, направленная вертикально вверх и обусловленная вращением i-й частиц компонентов исходного сырья;

$к_i$ – коэффициент подъемной силы Жуковского, действующей на i-ю частицу;

g – ускорение свободного падения м/с^2;

φ_i – коэффициент формы частицы в законе Стокса; η – вязкость воздуха, м^2/с;

$\Omega_i = \frac{V_{в_i}}{2\pi r_i}$ – угловая скорость вращения i-й частицы, с$^{-1}$.

Таким образом, уравнение вертикального перемещения в проекции на ось *oyi*-й частицы компонентов исходного сырья под действием направленного аэродинамического потока воздуха с учётом действия сил Стокса, Магнуса, Архимеда и Жуковского может быть представлено в виде

$$m_i \frac{\partial V_i}{\partial t} = -k_i \pi r_i^2 \rho_в (V_{x_i} + U)^2 + m_i g - \\ - \varphi_i \pi \eta_i r_i V_{y_i} + \pi \rho_в r_i^3 \Omega_i (V_{x_i} + U), \quad (3)$$

Учитывая, что $V_{y_i} \ll (V_{x_i} + U)$ в уравнениях 2, 3 не учитывается аэродинамическая сила лобового сопротивления в проекции на ось oy.

С учетом уравнения баланса сил Жуковского, Архимеда, Стокса и Магнуса скорость вертикального перемещения V_{y_i} i-й частицы компонентов исходного сырья получим в виде

$$V_{y_i} = \frac{r_i \rho_в [\frac{4}{3} r_i \left(\frac{\rho_i}{\rho_в} - 1\right) q + r_i (V_{x_i} + U) - k_i (V_{x_i} + U)^2]}{\varphi_i \eta_i}. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что при скорости направленного аэродинамического потока воздуха U вниз, по направлению оси *oy* будут перемещаться частицы компонентов, размеры которых определяются зависимостью

$$2k_i (V_{x_i} + U) > r_i > \frac{k_i (V_{x_i} + U)^2}{\frac{4}{3} r_i \left(\frac{\rho_i}{\rho_в} - 1\right) g + (V_{x_i} + U)}. \quad (5)$$

Кинетическая энергия поступательного движения i-й частицы при сходе с нижней кромки B наклонной полки определяется по формуле

$$E_i = \frac{2}{3} \pi r_i \rho_i V_{B_i}^2., \quad (6)$$

Таким образом, горизонтальная скорость движения i-й частицы становится равной нулю $V_{x_i} = 0$ в точке на горизонтальной поверхности приемного бункера БПФСА, определяемой из условия

$$X_{0_i} = \frac{E_i}{F_л^i}. \quad (7)$$

С учетом формул (1, 7) получим

$$X_{0_i} = \frac{2\rho_i V_{в_i}^{\ 2}}{3\rho_в U^2}. \quad (8)$$

Математическая модель третьей фазы процесса классификации в БПФСА многокомпонентных материалов, включающая уравнения 4, 5, 8, позволила всесторонне исследовать механизм разделения частиц под действием аэродинамических сил направленного воздушного потока с учетом их физических свойств и осуществить оптимизацию геометрических параметров и режимов работы БПФСА, при относительно небольших затратах на экспериментальные исследования, изготовление макетов и опытных образцов. Максимальные отклонения экспериментальных данных от расчетных составляет, в частности для асбеста 4...7 %, для кварца – 2,3...2,9 %, для глинозема – 1,9...2,2 % и аппроксимируются нелинейной зависимостью с корреляционным отношением η = 0,95...0,97.

Использование аэродинамического эффекта от направленного воздушного потока в БПФСА позволяет повысить эффективность разделения многокомпонентных материалов, в частности обеспечить максимальное извлечение свободного асбестового волокна из руды, сохранить природную длину и текстуру волокна, освободить асбестовое волокно от пыли, а также случайных посторонних включений.

Таким образом, установка радиальных вентиляторов на торцевых поверхностях вращающегося барабана, позволяющая использовать аэродинамические силы для разделения минералов за счет эффекта «парусности», способствует повышению эффективности и качества классификации материалов.

Предложенная модель переноса компонентов технологических смесей даёт возможность исследовать структуру их разделения на необходимые по качеству фракции для обеспечения качества строительных материалов, в том числе и огнеупоров.

Выводы. 1. Полученная математическая модель рабочего процесса полочного сепаратора с трамплином адекватно отражает процесс классификации частиц многокомпонентного исходного материала в направленном аэродинамическом потоке воздуха БПФСА.

2. Эффективность разделения частиц зависит от разности скоростей и углов схода частиц минералов с полки, что позволяет получить больший веер распределения частиц. В точке схода частицы с трамплина, в зависимости от коэффициента трения «f=0,3, f=0,5», её скорость составила V_{B_i} V_{B_i}=1,93...2,28; V_{B_i} V_{B_i}= 1,33...1,56 м/с.

3. Использование направленного потока воздушной струи под полку перпендикулярно вектору скорости движения разделяемых компонентов позволяет отклонять частицы, обладающие «парусностью», и выводить их в одноимённые продукты. Скорость воздушного потока зависит от скорости витания разделяемых компонентов и составляет 0,8...1,8 м/с, в зависимости от крупности минералов.

4. Применения БПФСА позволяет повысить качество концентратов за счет извлечения в одноименные продукты на 89,73 %.

Список литературы

1. Белов М. А., Дябин Н. В., Копосов Ю. Б. [и др.]. Практика обогащения асбестовых руд. М.: Недра, 1975. 224 с.

2. Келина И. М., Цыпин Е. Ф., Александрова Е. П. О коэффициентах трения минералов при обогащении слюдо содержащих сланцев на полочном воздушном сепараторе // Изв. вузов. Горный журнал. 1983. № 1. С. 126–129.

3. Ляпцев С. А., Потапов В. Я., Давыдов С. Я., Потапов В. В., Семериков Л. А., Васильев Е. А. Классификация материалов при ударе о разделительную поверхность // Новые огнеупоры. 2014. № 12. С. 27–30.

4. Ляпцев С. А., Цыпин Е. Ф., Потапов В. Я., Иванов В. В. Математическое моделирование разделения частиц в барабанно-полочном фрикционном сепараторе / // Изв. вузов. Горный журнал. 1996. № 7. С. 147–150.

5. Макаров В. М., Давыдов С. Я. Теоретические основы повышения эффективности вентиляции в аэродинамических процессах стройиндустрии // Огнеупоры. 2015. № 2. С. 59–63.

6. Makarov V. N., Davydov S. Ya. Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises // Springer science + business media, 2015, no. 2, pp. 59–63.

References

1. Belov M. A., Dyabin N. V., Koposov Yu. B. [et al.]. *Praktika obogashheniya asbestovyh rud* [Practice concentration of asbestos ores]. Moscow: Nedra, 1975. 224 p.

2. Kelina I. M., Tsypin E. F., Alexandrova E. P. *Izv. vuzov. Gorny zhurnal* (Math. universities. Mining Journal), 1983, no. 1, pp. 126–129.

3. Lyaptsev S. A., Potapov V. Ya., Davydov S. Ya., Potapov V. V., Semerikov L. A., Vasilyev E. A. *Novye ogneupory* (New refractories), 2014, no. 12, pp. 27–30.

4. Lyaptsev S. A., Tsypin E. F., Potapov V. Ya., Ivanov V. V. *Izv. vuzov. Gorny zhurnal* (Math. universities. Mining Journal), 1996, no. 7, pp. 147–150.

5. Makarov V. M., Davydov S. Ya. *Ogneupory* (Refractories), 2015, no. 2, pp. 59–63.

6. Makarov V. N., Davydov S. Ya. *Springer science + business media* (Springer science + business media), 2015, no. 2, pp. 59–63.

Коротко об авторах

Потапов Валентин Яковлевич, д-р техн. наук, профессор кафедры «Горная механика», Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: Науки о Земле, математическое моделирование
2c1@inbox.ru

Макаров Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор кафедры «Горная механика», Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: Науки о Земле, математическое моделирование
gmf.gm@m.ursmu.ru

Потапов Владимир Валентинович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Горное дело», Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: Науки о Земле, математическое моделирование
2c1@inbox.ru

Макаров Николай Владимирович, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Горная механика», Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: Науки о Земле, математическое моделирование
gmf.gm@m.ursmu.ru

Анохин Петр Михайлович, доцент, зам. зав. кафедрой «Пожарная безопасность», Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия. Область научных интересов: Науки о Земле, математическое моделирование
panokhin1@mail.ru

Briefly about the authors

Valentin Potapov, doctor of technical sciences, professor, Mining Mechanics department, Ural State Mining University. Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling

Vladimir Makarov, doctor of technical sciences, professor, Mining Mechanics department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling

Vladimir Potapov, candidate of technical sciences, associate professor, Mining department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling

Nikolay Makarov, candidate of technical sciences, associate professor, head of Mining Mechanics department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling

Pyotr Anokhin, associate professor, deputy of the head of Fire Safety department, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. Sphere of scientific interests: Earth sciences, mathematical modeling

Образец цитирования

Потапов В. Я., Макаров В. Н., Потапов В. В., Макаров Н. В., Анохин П. М. Математическое моделирование технологии классификации глиноземов в аэродинамических потоках фрикционных аппаратов // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2017. Т. 23. № 1. С. 44–51.
DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-1-44-51

Potapov V. Ya., Makarov V. N., Potapov V. V., Makarov N. V., Anokhin P. M. Mathematical modeling of alumina classification technology in aerodynamic flow of friction devices // Transbaikal State University Journal, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 44–51.

Дата поступления статьи: 19.12.2016 г.
Дата опубликования статьи: 31.01.2017 г.