

Д. т. н. **В. Н. Макаров**, д. т. н. **В. Я. Потапов**, д. т. н. **С. Я. Давыдов** (✉),
к. т. н. **Н. В. Макаров**

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»,
г. Екатеринбург, Россия

УДК 621.928:622.273+622.44

МЕТОД АДДИТИВНОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА УЗЛА КЛАССИФИКАЦИИ ФРИКЦИОННЫХ АППАРАТОВ

Предложен метод аддитивного аэродинамического расчета аэрационной классификации частиц компонентов материалов в зависимости от их физических свойств, объединенных интегральным критерием «парусности», и параметров управляемого направленного воздушного потока. Получены уравнения определения положения приемного бункера узла аэрационной классификации фрикционного барабанно-полочного сепаратора в зависимости от критериев аэродинамического подобия, обеспечивающего максимальное качество стратификации исходного сырья и, как результат, повышение качества строительных материалов. Подтверждена эффективность аэрационной классификации с использованием управляемого воздушного потока.

Ключевые слова: «парусность», интегральный критерий «парусности», физические характеристики, фрикционный сепаратор, аэрационная классификация, критерий аэрационного подобия.

Одним из путей повышения эффективности классификации и, как результат, повышения качества строительных материалов является создание ресурсоэффективных разделительных аппаратов и совершенствование структуры, технологии подготовки и разделения исходного сырья [1–5].

При разработке и проектировании аппаратов необходимо учитывать конструктивные особенности их структурных единиц, способствующие качественному разделению и классификации исходного сырья по его физическим характеристикам, возможность целенаправленного управления внешними факторами, влияющими на эффективность процесса разделения его компонентов в зависимости от их состава.

С позиции совершенствования разделения и классификации многокомпонентного исходного сырья, включающего в себя частицы, отличающиеся «парусностью», т. е. существенным влиянием на траекторию их движения аэродинамических сил, наиболее перспективно использование аэрационной классификации.

Аэрационная классификация — процесс разделения частиц многокомпонентного материала, которые отличаются «парусностью» под воздействием плотности энергии, определяемой кинетической энергией направленного потока воздуха, достаточной для формирования траекторий движения частиц, связанных

с положением приемного бункера аэрационной классификации.

Конструктивно аэрационная классификация реализована в барабанно-полочном фрикционном сепараторе (БПФСА) с устройством создания управляемого направленного аэродинамического потока воздуха [4, 5].

БПФСА представляет собой сепаратор (рис. 1), включающий наклонную полку 1, криволинейный трамплин 2, вращающийся барабан 3, приемные бункеры 4 аэрационной классификации. В торцы барабана 3 встроены радиальные вентиляторы 5 с осесимметричными коллекторами 6. Амплитудно-частотные регуляторы 7 обеспечивают требуемую плотность энергии, направле-

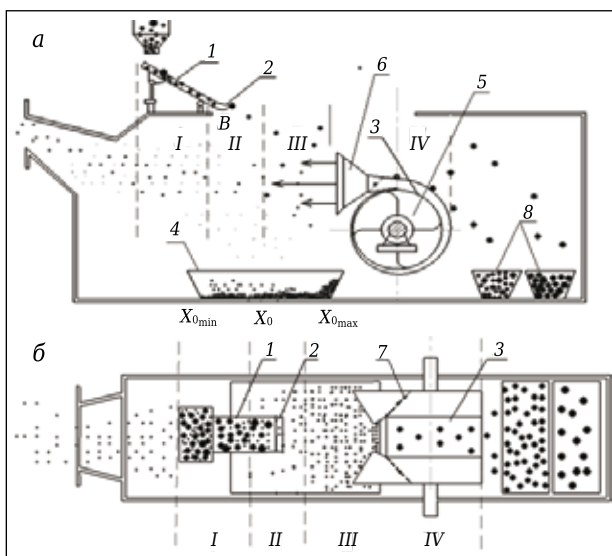


Рис. 1. Принципиальная схема сепаратора БПФСА: а — главный вид; б — вид сверху

✉
С. Я. Давыдов
E-mail: davidovtrans@mail.ru

ние, амплитуду и частоту колебания воздушного потока. Бункеры 8 предназначены для приема материала после фрикционной классификации.

Таким образом, БПФСА представляет собой совокупность четырех структурированных устройств (см. рис. 1, I–IV), каждое из которых предназначено для разделения частиц исходного материала по структурным признакам.

В соответствии с четырьмя структурированными устройствами в БПФСА выделяются четыре фазы движения исходного многокомпонентного сырья, соответствующие четырем этапам его классификации (см. рис. 1 и 2).

Механизм разделения и классификации исходного сырья на вышеуказанных фазах движения, за исключением аэрационной классификации, подробно описан в статье [6]:

- фаза I — движение многокомпонентного исходного сырья по наклонной полке 1 с углом наклона β , где происходит разделение частиц, движущихся с различными скоростями в силу различия их коэффициента трения;

- фаза II — движение исходного сырья по криволинейному трамплину 2, обеспечивающему необходимый диапазон вылета частиц с образованием веера разделения, благодаря которому осуществляется разделение частиц с различным содержанием полезного компонента;

- фаза III — разделение частиц исходного сырья под воздействием управляемого направленного воздушного потока, создаваемого вышеуказанными радиальными вентиляторами 5 — аэрационная классификация;

- фаза IV — разделение частиц исходного сырья на поверхности вращающегося барабана 3 вследствие различия их коэффициентов восстановления при ударе (см. рис. 1, 2).

В силу ограниченной информации по аналитическим исследованиям процесса аэрационной стратификации многокомпонентного исходного сырья, частицы которого отличаются «парусностью», путем его взаимодействия с направленным потоком воздуха, наиболее актуально исследовать аэродинамику процесса движения двухфазной среды для повышения эффективности разделения твердых компонентов в направленном воздушном потоке.

Данная статья посвящена уточнению аэродинамического расчета аэрационной классификации многокомпонентного исходного сырья с широким спектром «парусности», соответствующей процессу его классификации на фазе III движения в БПФСА. Решение этой задачи позволит повысить качество исходного сырья за счет эффективного использования влияния «парусности» частиц компонентов на величину действующих на них сил аэродинамического сопротивления, Стокса, Архимеда и Магнуса.

Математическая модель движения отдельных частиц на микроуровне в зависимости от

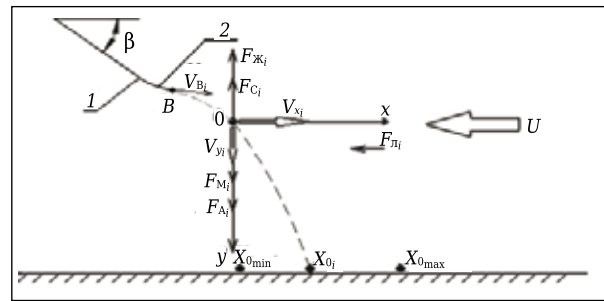


Рис. 2. Схема движения частицы и действующих на нее сил на фазе аэрационной классификации БПФСА

действующих на них сил, величина и направление которых зависят от «парусности» частиц, позволяет установить зависимость траектории движения двухфазной среды с заданным диапазоном «парусности» от плотности энергии, направления, амплитуды и частоты пульсации управляемого направленного воздушного потока. Модель позволяет рассчитывать параметры плотности энергии воздушного потока в зависимости от диапазона «парусности» частиц для обеспечения максимальной эффективности их классификации с минимальными затратами энергии.

Обладая кинетической энергией, i -я частица исходного многокомпонентного сырья под воздействием энергии управляемого направленного потока воздуха, перемещается по соответствующей траектории, определяемой плотностью вышеуказанной энергии. При этом необходимо иметь в виду, что плотность энергии воздушного потока (энергия единицы объема) соответствует удельной аэродинамической силе, т. е. силе, действующей на единичную поверхность.

Для интегральной оценки влияния «парусности», т. е. аэродинамических сил, на траекторию движения частиц и двухфазной среды, включающей в себя воздушный поток и частицы многокомпонентного сырья, целесообразно ввести критерии аэрационного подобия:

- коэффициент аэрационного притяжения, характеризующий вертикальную перегрузку частицы или двухфазной среды под действием аэродинамических сил:

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^n F_{b_i}^j}{F_{A_i}}, \quad (1)$$

где $F_{b_i}^j$ — вертикальная составляющая j -й аэродинамической силы, действующей на i -ю частицу многокомпонентного исходного сырья в фазе аэрационной классификации; F_{A_i} — сила Архимеда направленная вниз, действующая на i -ю частицу, являющаяся аналогом силы тяжести;

- коэффициент аэрационной инерции, характеризующий горизонтальную перегрузку частицы или двухфазной среды под действием аэродинамических сил:

$$\beta_i = \frac{\sum_{j=1}^n F_{\Gamma_i}^j}{F_{A_i}} \quad (2)$$

где $F_{\Gamma_i}^j$ — горизонтальная составляющая j -й аэродинамической силы, действующей на i -ю частицу многокомпонентного исходного сырья в фазе аэрационной классификации.

Для установления зависимости между энергией частицы в точке схода B (рис. 2) с наклонной полки 1 и криволинейного трамплина 2, энергией направляемого потока воздуха и геометрическими параметрами приемных бункеров 4 БПФСА (см. рис. 1) в фазе аэрационной классификации построим уравнения движения частицы в зависимости от действующих на нее сил с учетом введенных выше критериев аэрационного подобию.

Поскольку наибольшее влияние на траекторию движения частиц на фазе III оказывают аэродинамические силы, траектория движения частицы будет определяться ее «парусностью», которая зависит от коэффициентов аэродинамического притяжения и инерции.

Предложенный метод аддитивного аэродинамического расчета аэрационной классификации отличается отдельным учетом влияния скорости движения частиц (V_{x_i} , V_{y_i}) и скорости управляемого направленного воздушного потока U (см. рис. 2) как в критериях аэрационного подобию, так и в уравнениях движения этих частиц.

Относительная скорость движения частицы определяется разностью ее скоростей (V_{x_i} , V_{y_i}) относительно системы координат Ox и скорости управляемого направленного воздушного потока U . Поскольку скорость управляющего потока U направлена в сторону, противоположную оси Ox , то относительная скорость частицы определяется сложением модулей скоростей частицы относительно оси Ox и воздушного потока (см. рис. 2).

Такой подход позволяет исследовать влияние управляемого потока на траекторию движения частиц, определить ее рациональные значения.

Свободный полет частицы многокомпонентного исходного сырья на стадии III его движения в БПФСА начинается из точки B со скоростью V_{B_i} , т. е. с соответствующей кинетической энергией (см. рис. 2). При этом скорость движения частицы зависит от ее физических свойств: плотности, состояния поверхности, размеров, формы, петрографического состава, взаимного трения и столкновения частиц между собой и со стенками аппарата.

Таким образом, движение i -й частицы с кинетической энергией, соответствующей скорости V_{B_i} , из точки B будет происходить под действием силы аэродинамического сопротивления, подъемной аэродинамической силы Жуковского, силы Магнуса, обусловленной перепадом сил аэродинамического давления на поверхности частицы вследствие ее вращения, силы Архимеда,

связанной с ускорением свободного падения, и силой Стокса, обусловленной вязкостью воздуха [7]. Поскольку наибольшее влияние на траекторию движения частицы на данной фазе оказывают аэродинамические силы, характер движения частицы будет определяться ее «парусностью», которая численно зависит от коэффициентов аэрационного притяжения α_i и инерции β_i .

При движении i -й частицы в направлении оси Ox на нее действует сила аэродинамического лобового сопротивления $F_{л_i}$, обусловленная как скоростью собственного движения частицы, так и скоростью управляемого направленного потока воздуха, направленного, как сказано выше, в сторону, противоположную оси Ox .

Уравнение движения i -й частицы компонентов исходного сырья в проекции на ось Ox , направленную противоположно аэродинамическому потоку воздуха от действия вентиляторов, в соответствии с классическим уравнением Ньютона запишем в виде:

$$F_{л_i} = m_i \frac{\partial V_{x_i}}{\partial t} = -k_i \pi r_i^2 \rho_v (V_{x_i} + U)^2, \quad (3)$$

где m_i — масса i -й частицы, кг, $m_i = \frac{4}{3} \pi r_i^3 \rho_i$; V_{x_i} — составляющая скорости i -й частицы, м/с; k_i — коэффициент лобового сопротивления i -й частицы; r_i — радиус i -й частицы, м; ρ_v — плотность воздуха, кг/м³; U — скорость потока воздуха, м/с; ρ_i — плотность i -й частицы, кг/м³.

Уравнение движения i -й частицы в проекции на ось Oy имеет вид:

$$m_i \frac{\partial V_{y_i}}{\partial t} = F_{A_i} - F_{ж_i} - F_{C_i} + F_{M_i}, \quad (4)$$

где F_{A_i} — сила Архимеда, направленная вниз, действующая на i -ю частицу, являющаяся аналогом силы тяжести, $F_{A_i} = \frac{4}{3} \pi r_i^3 (\rho_i - \rho_v) g$; $F_{ж_i}$ — сила Жуковского, направленная вертикально вверх, действующая на i -ю частицу, $F_{ж_i} = c_i \pi r_i^2 \rho_v (V_{x_i} + U)^2$; F_{C_i} — сила сопротивления Стокса, обусловленная вязкостью воздуха и физическими свойствами компонентов исходного сырья, $F_{C_i} = \varphi_i \rho_v \pi \eta r_i V_{y_i}$; F_{M_i} — сила Магнуса, обусловленная вращением i -й частицы компонентов исходного сырья, $F_{M_i} = \pi \rho_i r_i^3 \Omega_i (V_{x_i} + U)$; c_i — коэффициент подъемной силы Жуковского, действующей на i -ю частицу; g — ускорение свободного падения, м/с²; φ_i — коэффициент формы частицы в законе Стокса; η — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с; Ω_i — угловая скорость вращения i -й частицы, с⁻¹, $\Omega_i = \frac{V_{B_i}}{2\pi r_i}$.

Таким образом, уравнение вертикального перемещения в проекции на ось Oy i -й частицы компонентов исходного сырья под действием управляемого направленного потока воздуха с учетом действия сил Стокса, Магнуса, Архимеда и Жуковского может быть представлено в виде:

$$m_i \frac{\partial V_{yi}}{\partial t} = \frac{4}{3} \pi r_i^3 (\rho_i - \rho_b) g - c_i \pi r_i^2 \rho_b (V_{xi} + U)^2 - \varphi_i \pi r_i V_{yi} + \pi \rho_b r_i^3 \Omega_i (V_{xi} + U). \quad (5)$$

Поскольку $V_{yi} \ll (V_{xi} + U)$, в уравнениях (4) и (5) не учитывается аэродинамическая сила лобового сопротивления в проекции на ось Oy .

Выражения для критериев аэрационного подобия: коэффициентов аэрационного притяжения и инерции с учетом уравнений (1)–(3) и (5) после преобразования получим в виде:

$$\alpha_i = \frac{F_{Mi} - F_{Жi}}{F_{Ai}} = \frac{3(V_{xi} + U)}{4(\rho_i - \rho_b)g} \left(\rho_i \Omega_i - \frac{c_i \rho_b (V_{xi} + U)}{r_i} \right); \quad (6)$$

$$\beta_i = - \frac{F_{Ii}}{F_{Ai}} = \frac{3k_i \rho_b (V_{xi} + U)^2}{4r_i (\rho_i - \rho_b) g}. \quad (7)$$

Из уравнений (6) и (7) видно, что интегральный критерий «парусности»: коэффициенты аэрационного притяжения и инерции зависят от формы частицы, определяющей коэффициенты k_i , φ_i , c_i , ее размера r_i , плотности ρ_i и скорости управляющего потока U .

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

$$V_{yi} = \frac{r_i \left[\frac{4}{3} r_i \left(\frac{\rho_i}{\rho_b} - 1 \right) g + r_i \Omega_i (V_{xi} + U) - c_i (V_{xi} + U)^2 \right]}{\varphi_i \pi}. \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что при скорости направленного аэродинамического потока воздуха $U = U_0$ по направлению оси Oy будут перемещаться частицы компонентов, размеры которых определяются зависимостью

$$r_{oi} > \frac{c_i (V_{xi} + U_0)^2}{\frac{4}{3} r_i \left(\frac{\rho_i}{\rho_b} - 1 \right) g + (V_{xi} + U_0) \Omega_i}. \quad (9)$$

Энергия i -й частицы в точке схода B криволинейного трамплина 2 (см. рис. 2) определяется по формуле

$$E_i = \frac{m_i V_{Bi}^2}{2} = \frac{2}{3} \pi r_i^3 \rho_i V_{Bi}^2. \quad (10)$$

Таким образом, горизонтальная скорость движения i -й частицы становится равной нулю $V_{xi} = 0$ в точке X_{0i} , соответствующей положению приемного бункера 4 аэрационной классификации БПФСА, определяемой из условия равенства энергии E_i работе силы лобового аэродинамического сопротивления $F_{ли}$ на расстоянии x_{0i} :

$$X_{0i} = E_i / E_{ли}. \quad (11)$$

С учетом формул (1) и (9) получим

$$X_{0i} = \frac{2\rho_i V_{Bi}^2 r_i}{3\rho_b U_0^2 c_i}. \quad (12)$$

Формула для расчета вертикальной скорости перемещения i -й частицы в функции от ко-

эффициента аэрационного притяжения с учетом уравнений (5) и (6) после соответствующих преобразований будет иметь вид:

$$V_{yi} = 0,75 \frac{(1 + \alpha_i)(\rho_i - \rho_b)r_i^2 g}{\varphi_i \pi \rho_b}. \quad (13)$$

Критериальное уравнение для расчета положения приемного бункера аэрационной классификации X_{0i} в функции от коэффициента аэрационной инерции после соответствующих преобразований с учетом (7) и (12) получим в виде:

$$X_{0i} = \frac{\rho_i V_{Bi}^2}{2\beta_{0i}(\rho_i - \rho_b)g}. \quad (14)$$

Таким образом, диапазон изменения «парусности» частиц исходного многокомпонентного сырья, определяемый изменением коэффициента аэрационного притяжения α_{0i} от α_{0min} до α_{0max} и коэффициента аэрационной инерции β_{0i} от β_{0min} до β_{0max} , определяет рациональное положение приемного бункера узла аэрационной классификации в диапазоне от X_{0min} до X_{0max} при заданной скорости управляющего потока $U = U_0$.

Метод аддитивного аэродинамического расчета аэрационной классификации на фазе III движения в БПФСА многокомпонентных материалов, частицы которых отличаются «парусностью», позволил всесторонне исследовать механизм разделения частиц под действием аэродинамических сил управляемого направленного воздушного потока с учетом критериев аэрационного подобия, оптимизировав местоположение приемных бункеров аэрационной классификации и скорости управляемого направленного потока.

Использование аэродинамического эффекта от управляемого 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод аддитивного аэродинамического расчета аэрационной классификации рабочего процесса полочного сепаратора с устройством создания управляемого направленного воздушного потока адекватно отражает реальный процесс формирования траекторий движения твердых частиц двухфазной среды.

Существенное влияние на качественный состав разделяемых компонентов при заданной «парусности» оказывает управляемый направленный воздушный поток. Аддитивная аэродинамическая модель аэрационной классифи-

кации позволяет проанализировать влияние скорости управляемого направленного потока воздуха на траекторию движения частиц многокомпонентного исходного сырья, способствуя повышению качества готового продукта в технологии производства строительных материалов.

Библиографический список

1. Практика обогащения асбестовых руд / под ред. Ф. П. Софронова. — М. : Недра, 1975. — 224 с.
2. **Келина, И. М.** О коэффициентах трения минералов при обогащении слюдосодержащих сланцев на полочном воздушном сепараторе / *И. М. Келина, Е. Ф. Цыпин, Е. П. Александрова* // Изв. вузов. Горный журнал. — 1983. — № 1. — С. 126–129.
3. **Ляпцев, С. А.** Математическое моделирование разделения частиц в барабанно-полочном фрикционном сепараторе / *С. А. Ляпцев, Е. Ф. Цыпин, В. Я. Потапов, В. В. Иванов* // Изв. вузов. Горный журнал. — 1996. — № 7. — С. 147–150.
4. **Ляпцев, С. А.** Классификация материалов при ударе о разделительную поверхность / *С. А. Ляпцев, В. Я. Потапов, С. Я. Давыдов* [и др.] // Новые огнеупоры. — 2014. — № 12. — С. 10–13.
Lyaptsev, S. A. Classification of granular material in an impact with a separation surface / *S. A. Lyaptsev, V. Ya. Potapov, S. Ya. Davydov* [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 55, № 6. — P. 570–572.
5. **Макаров, В. Н.** Теоретические основы повышения эффективности вентиляции в технологических про-

цессах на промышленных предприятиях / *В. Н. Макаров, С. Я. Давыдов* // Новые огнеупоры. — 2015. — № 2. — С. 59–63.

Makarov, V. N. Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises / *V. N. Makarov, S. Ya. Davydov* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 103–106.

6. **Потапов, В. Я.** Использование аэродинамического эффекта в фрикционных сепараторах для разделения минеральных комплексов, обладающих парусностью / *В. Я. Потапов, С. Я. Тимухин, В. В. Потапов* [и др.] // Изв. УГГУ. — 2011. — Вып. № 25/26. — С. 84–89.
7. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование пневматического транспорта: вчера, сегодня, завтра: теория, расчет, исследования, производство / *С. Я. Давыдов, А. Н. Семин*. — М. : Фонд «Кадровый резерв», 2016. — 472 с. ■

Получено 03.08.16
© В. Н. Макаров, В. Я. Потапов,
С. Я. Давыдов, Н. В. Макаров, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

15-Й ВСЕМИРНЫЙ КОНГРЕСС

И ОБЪЕДИНЕННАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ОГНЕУПОРАМ



26–29 сентября 2017 г. г. Сантьяго, Чили

ОСНОВНЫЕ ТЕМЫ

- Испытания огнеупоров
- Новые установки и оборудование
- Монолитные огнеупоры
- Огнеупоры для сталелитейной промышленности
- Сырьевые материалы и глобальные вопросы
- Огнеупоры для стекольной промышленности
- Огнеупоры для цементной промышленности
- Моделирование огнеупоров
- Нефтехимия
- Огнеупоры для энергетики и переработки отходов
- Экономия энергии за счет применения огнеупоров
- Бескислородные огнеупорные системы
- Огнеупоры для химических процессов
- Разработки основных огнеупоров
- Образование в области огнеупоров
- Огнеупоры для цветной металлургии
- Безопасность, окружающая среда, переработка огнеупоров

<http://www.expoclub.ru/db/exhibition/view/7983/>
<http://unitecr2017.org>