

# Мельницы могут работать эффективней!

Одними из наиболее распространенных дисперсных наполнителей полимерных композиционных материалов являются минеральные порошки природного происхождения, однородность гранулометрического состава которых во многом определяет стабильность свойств композиционного материала. В настоящее время основной объем минеральных порошков получают путем механического измельчения природного сырья, используя для этих целей мельницы различных типов. Комбинация мельничного и классифицирующего оборудования образует технологические системы измельчения, показатели работы которых находятся в прямой зависимости от условий ведения процесса. Увеличить производительность помольных участков можно за счет повышения эффективности воздушной классификации минеральных порошков.

**А. Б. Липилин**, генеральный директор, **Н. В. Коренюгина**, главный технолог, **М. В. Векслер**, инженер, завод «ТЕХПРИБОР»

Хорошо известно, что технико-экономическая эффективность любого помольного участка оценивается, прежде всего, по двум критериям: насколько показатели гранулометрического состава полученного порошка будут соответствовать заданным значениям и каковы затраты на его производство. В свое время было подмечено [1], что причиной высокого расхода (а точнее, перерасхода) энергии на получение продукта заданной дисперсности, является тормозящее действие тонких частиц, которые, оставаясь в массе материала, затрудняют измельчение крупных. Другими словами, чем быстрее и полнее из корпуса мельницы будут выведены частицы нужных размеров, тем меньше будут затраты энергии на помол и, соответственно, тем ниже будет себестоимость полученного порошка.

Разделение измельчаемого сырья на готовый порошок и так называемую «крупку» – задача воздушных классификаторов. Полнота отделения мелких частиц от крупных характеризует эффективность классификатора. В англоязычной литературе этот параметр часто называют «separation sharpness» – «четкость разделения», что вполне точно отражает суть решаемой задачи. Чем точнее или, иначе, «четче» будет разделен исходный порошок, тем выше фракционная чистота тонкого продукта, и тем меньше мелких частиц, не выделенных из «крупки», уйдет в мельницу на домол, а точнее – на энергозатратное переизмельчение [1].

Производственная практика показывает, что увеличение эффективности классификации позволяет увеличить единичную производительность мельничного оборудования на 15–30 %, примерно на столько же сократив удельные расходы на помол [2].

Для того чтобы правильно оценить эффективность воздушной классификации, должны быть из-

вестны показатели гранулометрического состава порошка на входе в классификатор и тонкого продукта. Далее необходимо настроить воздушный классификатор на разделение продукта помола по **заданной** или, иначе, **технологической границе разделения**. Граница разделения – это некоторый условный размер частиц  $d_{c.s.}$ , относительно которого должно соблюдаться правило: все частицы размером больше  $d_{c.s.}$  (крупная фракция) должны быть собраны в «крупку», а меньшие (мелкая фракция) – в тонком продукте. Очевидно, что чем мельче частица, тем больше вероятность ее попадания в тонкий продукт, а чем крупнее, тем больше вероятность ее попадания в «крупку». Другими словами, процесс воздушной классификации носит вероятностный характер. Поэтому под **фактической границей разделения** понимают медианный размер некоторого узкого класса частиц, имеющих равную вероятность попадания как в крупный, так и в мелкий продукт. Такая величина обозначается  $d_{50}$  и характеризует **вероятностную границу разделения**, которая определяется конструкцией классификатора и его настройками, поэтому она может существенно отличаться от технологической границы, заданной исходя из требований к гранулометрическому составу целевого продукта [3].

На производстве, когда гранулометрический состав целевого продукта задан требованиями нормативной документации, эффективность классификации может быть определена двумя показателями – фракционной чистотой целевого продукта ( $C_c$  или  $F_f$ ) и извлечением  $\eta$  соответствующей фракции, под которым понимают отношение массы частиц нужной фракции к массе частиц этой же фракции в питании классификатора. Значения извлечения крупной ( $\eta_c$ ) и мелкой ( $\eta_f$ ) фракций рассчитываются по следующим формулам:

$$\eta_c = \frac{m_c \cdot C_c}{m_i \cdot C_i} = \frac{\gamma_c \cdot C_c}{C_i};$$

$$\eta_f = \frac{m_f \cdot F_f}{m_i \cdot F_i} = \frac{\gamma_f \cdot F_f}{F_i},$$

где  $m_i, m_c$  и  $m_f$  – масса исходного материала, крупного и мелкого продуктов соответственно;  $C_i, C_c$  и  $C_f$  – содержание крупной фракции в питании классификатора, «крупке» и мелком продуктах соответственно;  $F_i, F_c$  и  $F_f$  – содержание мелкой фракции в исходном материале, «крупке» и мелком продуктах соответственно.

Содержание определенной фракции в соответствующем продукте  $C_c$  и  $F_f$  называют фракционной чистотой продуктов, а величины  $C_f$  и  $F_c$  – загрязнениями продуктов.

Выход продуктов количественно характеризуют отношением массы частиц данной фракции к питанию (массе исходного материала) классификатора. Так,  $\gamma_c$  и  $\gamma_f$  – выход «крупки» и мелкого продукта соответственно. Очевидно, что

$$\gamma_c + \gamma_f = 1.$$

Выход  $\gamma$  дает количественную оценку разделения, а извлечение  $\eta$  характеризует эффективность разделения. На практике для расчета технологических показателей процесса классификации часто используются формулы, не содержащими массовых показателей [3]:

$$\gamma_c = \frac{C_i - C_f}{C_c - C_f}; \gamma_f = \frac{F_i - F_c}{F_f - F_c};$$

$$\eta_c = \frac{C_c}{C_i} \cdot \frac{C_i - C_f}{C_c - C_f}; \eta_f = \frac{F_f}{F_i} \cdot \frac{F_i - F_c}{F_f - F_c}.$$

Для определения эффективности воздушной классификации на заводе «ТЕХПРИБОР» (г. Щекино, Тульская обл.) был проведен эксперимент по разделению минерального порошка с помощью центробежных классификаторов различных конструкций:

- воздушно-проходного сепаратора «КАСКАД-М4» (ВПС) с регулируемым направляющим аппаратом и статической зоной разделения (рис. 1). Подобное оборудование широко применяется в комбинации с мельницами для разделения сыпучих материалов в диапазоне крупности от 63 до 400 мкм;

- воздушно-центробежного классификатора «СЕЛЕКТОР-500/1500» (ВЦК) с приводным делительным ротором и динамической зоной разделения (рис. 2). Данные классификаторы используются на современных производствах для получения порошков с преобладающим размером частиц от 10 до 200 мкм.

Данные агрегаты относятся к группе воздушно-центробежных или, иначе, вихревых классификаторов. Разделение полидисперсных порошков по крупности частиц происходит во вращающемся потоке воздуха за счет взаимодействия центробежных сил и давления воздуха, который нагнетается вентилятором. В обоих классификаторах смесь воздуха с материалом подается снизу, а главное их отличие состоит в способе формирования вихря. В воздушно-проходном сепараторе «КАСКАД-М4» (ВПС) для этого используется направляющий аппарат, который состоит из поворотных лопаток, закручивающих воздушный поток, а в воздушно-центробежном классификаторе «СЕЛЕКТОР-500/1500» (ВЦК) эту задачу выполняет делительный ротор, который приводится во вращение собственным электродвигателем. В первом аппарате регулировка границы разделения производится поворотом лопаток направляющего аппарата, что позволяет изменять текущий радиус вихря, а значит, и тангенциальную скорость частиц, во втором – граница разделения регулируется за счет изменения частоты вращения делительного ротора.

Крупные и, следовательно, обладающие большими размерами и массой частицы под действием центро-

**ПЕРИФЕРИЙНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**




Охладители воды и термостаты

Системы сушки и подачи сырья  
Термоконтроллеры и дробилки



www.invent-group.ru

ООО "Инвент Сервис", 117279, г. Москва, ул. Профсоюзная, дом 93А, оф. 234  
тел. +7 (495) 620 6204 / факс + 7(495) 620 6205; e-mail: sales@invent-group.ru

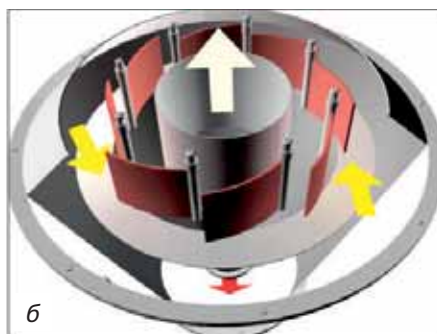


Рис. 1. Внешний вид (а) и схема работы (б) воздушно-проходного сепаратора «КАСКАД-М4» (ВПС): желтыми стрелками показано направление питания классификатора, белой и красной – выхода тонкого продукта и крупки соответственно

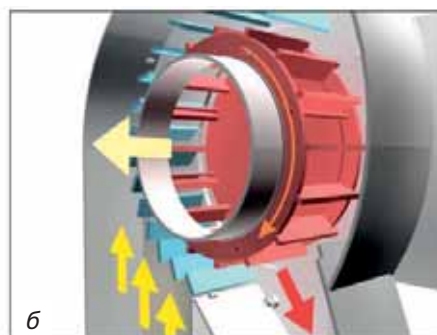


Рис. 2. Внешний вид (а) и схема работы (б) воздушно-центробежного классификатора «СЕЛЕКТОР-500/1500» (ВЦК) (пояснения те же, что в подписи к рис. 1)

Таблица 1. Гранулометрический состав (%) минерального порошка при его классификации на воздушно-проходном сепараторе «КАСКАД-М4» (ВПС)

Класс крупности, мкм	Исходный порошок	«Крупка»	Тонкий продукт
+180	6,5	11,6	0,30
-180 +100	9,2	16,1	2,58
-100 +71	26,3	18,7	17,71
-71 +55	5,0	15,9	18,57
-55 +38	5,3	8,65	3,68
-38	47,7	35,05	57,16
Всего	100,0	100,0	100,0

Таблица 2. Гранулометрический состав (%) минерального порошка при его классификации на воздушно-центробежном классификаторе «СЕЛЕКТОР-500/1500» (ВЦК)

Класс крупности, мкм	Исходный порошок	«Крупка»	Тонкий продукт
+180	6,5	10,84	–
-180 +100	9,2	17,7	–
-100 +71	26,3	43,07	1,30
-71 +55	5,0	6,5	11,08
-55 +38	5,3	2,43	17,0
-38	47,7	19,46	70,62
Всего	100,0	100,0	100,0

бежных сил отбрасываются к стенкам корпуса классификаторов, теряют свою скорость, оседают в сборнике «крупки», выводятся из классификатора и отправляются в мельницу на доизмельчение. Но если в статической зоне разделения воздушно-проходного сепаратора «КАСКАД-М4» (ВПС) скорость частиц в зоне разделения не может превышать скорость несущего воздушного потока, то в динамической зоне разделения воздушно-центробежного классификатора «СЕЛЕКТОР-500/1500» (ВЦК), оснащенного делительным ротором с электроприводом, скорость, а вместе с ней и центробежная сила, действующая на частицы, значительно выше.

Эффективность классификации воздушно-проходного сепаратора «КАСКАД-М4» (ВПС) и воздушно-центробежного классификатора «СЕЛЕКТОР-500/1500» (ВЦК) сравнивали на примере минерального порошка, гранулометрический анализ отобранных проб которого проводили на лазерном дифракционном анализаторе частиц модели Fritch Particle Sizer Analysette 22.

Об эффективности воздушно-проходного сепаратора «КАСКАД-М4» (ВПС) при заданной технологи-

ческой границе разделения (71 мкм) свидетельствуют данные о гранулометрическом составе минерального порошка и продуктов его классификации, приведенные в табл. 1.

Как видно из таблицы (если сложить 3 предпоследних числа во второй графе), в исходном минеральном порошке содержится 58,0 % частиц размерами менее 71 мкм (фракция -71 мкм). После классификации получен тонкий продукт с содержанием 79,41% частиц размером менее 71 мкм. Извлечение фракции +71 мкм (т. е. частиц с размерами более 71 мкм) в «крупку» составило:

$$\eta_c = \frac{C_c \cdot C_i - C_f}{C_i \cdot C_c - C_f} = \frac{46,4 \cdot 42,0 - 20,59}{42,0 \cdot 46,4 - 20,59} = 1,1047 \cdot 0,8295 = 91,63 \%,$$

при этом выход фракции +71 мкм оказался равным 82,95 %, а -71 мкм – 17,05 %.

Извлечение фракции -71 мкм в тонкий продукт составило:

$$\eta_f = \frac{F_f \cdot F_i - F_c}{F_i \cdot F_f - F_c} = \frac{79,41 \cdot 58,0 - 53,6}{58,0 \cdot 79,41 - 53,6} = 1,3691 \cdot 0,1704 = 23,32 \%.$$

Таким образом, эффективность разделения воздушно-проходного сепаратора «КАСКАД-М4» (ВПС) по технологической границе разделения 71 мкм составила 57,5 %, что является вполне обычным показателем работы классификаторов данной конструкции.

Далее при той же заданной технологической границы разделения (71 мкм) вычислим эффективность воздушно-центробежного классификатора «СЕЛЕКТОР-500/1500» (ВЦК). Гранулометрический состав минерального порошка и продуктов его классификации приведен в табл. 2.

После классификации тонкий продукт представлен частицами размером менее 71 мкм ( $D_{99} = 71$  мкм). Далее проведем расчет, подобный предыдущему. Так, извлечение фракции +71 мкм в «крупку» составило:

$$\eta_c = \frac{C_c}{C_i} \cdot \frac{C_i - C_f}{C_c - C_f} = \frac{71,61}{42,0} \cdot \frac{42,0 - 1,3}{71,61 - 1,3} = 1,7017 \cdot 0,5788 = 98,67\%$$

При этом выход фракции +71 мкм оказался равным 57,88 %, соответственно выход фракции -71 мкм - 42,12 %. Извлечение фракции -71 мкм в тонкий продукт составило:

$$\eta_f = \frac{F_f}{F_i} \cdot \frac{F_i - F_c}{F_f - F_c} = \frac{98,7}{58,0} \cdot \frac{58,0 - 28,39}{98,7 - 28,39} = 1,7017 \cdot 0,4211 = 71,66\%$$

Эффективность разделения воздушно-центробежного классификатора «СЕЛЕКТОР-500/1500» (ВЦК) по технологической границе 71 мкм составляет 85,2 %, что является хорошим показателем работы классификатора.

По итогам проведенного эксперимента по сравнению эффективности воздушно-центробежных классификаторов различных конструкций можно сделать следующие выводы:

- лучшие результаты классификации минерального порошка при заданной границе разделения (71 мкм) показал воздушно-центробежный классификатор «СЕЛЕКТОР-500/1500» (ВЦК). Его эффективность оказалась выше, чем у воздушно-проходного сепаратора «КАСКАД-М4» (ВПС) на 28 %;

- качество тонкого продукта, полученного на воздушно-центробежном классификаторе «СЕЛЕКТОР-500/1500» (ВЦК) также оказалось выше: фракционная чистота  $F_f$  оказалась равной 98,7 % по сравнению с 79,41 % у воздушно-проходного сепаратора «КАСКАД-М4» (ВПС).

Таким образом, использование современного оборудования воздушной классификации позволяет не только получать порошки более высокой фракционной чистоты, что зачастую является синонимом качества продукта, но и существенно (в данном случае примерно на 28 %) уменьшить циркуляцию «мелочи», а следовательно, настолько же повысить производительность мельниц в производстве минеральных порошков.

### Литература

1. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности. М.: Химия, 1977. 368с.
2. Мизонов В. Е., Ушаков С. Г. Аэродинамическая классификация порошков. М.: Химия, 1989. 160 с.
3. Гальперин В. И. Воздушная классификация сыпучих материалов. М.: Химическая промышленность, 2006. 90 с.

### Mills Can Work More Efficiently!

A. B. Lipilin, N. V. Korenjugina, M. V. Vexler

Currently bulk mineral powders obtained by mechanical comminution of natural raw materials, using for this purpose any type of mills. The combination of a mill and classifying equipment forms the technological systems of grinding, performance which are directly dependent on the terms of reference of the process. Increase the performance of grinding parts can be achieved by improving the efficiency of air classification of mineral powder. ■

**НОВАЯ  
ОРБИТА**  
Инжиниринговая компания



Проект



Поставка



Монтаж



Сервис

**Frigel**  
Intelligent Process Cooling

**Максимальная экономия  
электроэнергии в холодный  
период при использовании  
пассивных самодренирующихся радиаторов.**

**Охлаждайтесь за счет окружающей среды!**

**Доверьте охлаждение производства системе ECODRY - это надежно, технологично и очень выгодно!**

Адрес: 123592, г. Москва, ул. Кулакова, д. 20 Тел.: 8-800-505-01-05 Факс: (499) 740-22-28 E-mail: info@novayaorbита.ru www.novayaorbита.ru

