

УДК 621.928

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СЕПАРАТОРА ПРИ СНИЖЕНИИ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛЕНИЯ

ШУВАЛОВ С.И., д-р техн. наук, АНДРЕЕВ А.А., асп.

Рассмотрено влияние эффективности разделения сепаратора на дисперсный состав и долю выхода готовой пыли из сепаратора. Показано, что падение эффективности разделения при уменьшении границы разделения приводит к ограничению тонкости готовой пыли.

Ключевые слова: сепаратор, дисперсный состав пыли, граничный размер разделения сепаратора.

SEPARATOR WORKING PERCULIARITIES WITH THE SEPARATION LEVEL DECREASE

SHUVALOV S.I., Ph.D., ANDREEV A.A., postgraduate

The article concerns the division efficiency influence on dispersed content and on the output part of the ready dust from separator. When separation boundary is decreasing separation efficiency reduction leads to ready dust fineness limitation.

Key words: separator, dispersed dust content, separator division boundary size.

Получение порошковых материалов, в частности угольной пыли, основывается на процессах измельчения достаточно крупных кусков в мельницах и последующей классификации по размерам выходящих из мельницы измельченных частиц (мельничного продукта) в сепараторах. Для получения порошков со средним размером менее 100 мкм используются, как правило, центробежные сепараторы, в которых классификация частиц происходит под воздействием направленных в противоположные стороны центробежной силы, пропорциональной размеру частиц в кубе, и силы аэродинамического сопротивления, пропорциональной квадрату размера частиц. Центробежная сила стремится переместить частицу к периферии зоны разделения и вывести ее в крупный продукт классификации, сила аэродинамического сопротивления увлекает частицу к центру зоны разделения и выводит ее в мелкий (готовый) продукт классификации.

Наиболее эффективно процесс классификации частиц в центробежном поле происходит в плоскопротivotочной зоне разделения, когда центробежная сила и сила аэродинамического сопротивления направлены в строго противоположные стороны. Такая схема организации движения пылегазового потока реализована, в частности, в статических сепараторах ИГЭУ [1], где закрутка потока осуществляется за счет ввода частиц и газа в зону разделения через установленные под некоторым углом лопатки, в динамических сепараторах ВВЦ с плоскими вращающимися дисками [2] и динамических сепараторах Леше [3] с вращающейся цилиндрической корзиной, образованной из лопаток, установленных перпендикулярно потоку.

Размер частиц, для которых значения альтернативных сил равны по абсолютной величине и противоположны по направлению, называется равновесным. Так как центробежная сила и сила аэродинамического сопротивления изменяются в зависимости от радиуса зоны разделения по различным законам, то для каждого радиуса зоны существует свой равновесный размер частиц, зависящий от удельной плотности частиц и газа, конструктивных особенностей сепаратора, расхода газа через сепаратор и степени закрутки потока, определяемой углом установки лопаток в статическом сепараторе ИГЭУ или скоростью вращения дисков и корзины в динамических сепараторах ВВЦ и Леше.

В идеальном случае все частицы крупнее равновесного размера должны перемещаться к пе-

риферии зоны разделения, все более мелкие частицы – перемещаться к центру зоны, а частицы равновесного размера – двигаться по окружности. В действительности такого явления не наблюдается, так как поле скоростей газа неоднородно по высоте зоны разделения, а на траектории движения частиц оказывают влияние их взаимные соударения и турбулентные пульсации газового потока. Вследствие воздействия этих факторов и неоднозначности равновесных размеров в сепараторе любой конструкции наблюдается неидеальность процесса разделения, проявляющаяся в том, что частицы одинакового размера попадают как в крупный, так и в мелкий продукты разделения.

Вероятность выделения частиц размером δ в мелкий продукт сепаратора задается кривой разделения $\varphi_{\delta}(\delta)$ [1]. Наиболее важной интегральной характеристикой кривой разделения является граничный размер $\delta_{гр}$, представляющий средневзвешенный равновесный размер сепаратора и соответствующий размеру частиц, для которых вероятность выноса в мелкий и крупный продукты одинакова:

$$\varphi_{\delta}(\delta_{гр}) = 0,5.$$

Для получения более мелкой пыли необходимо снизить граничный размер, увеличив влияние центробежной силы или уменьшив влияние силы аэродинамического сопротивления. В статических сепараторах ИГЭУ повышение закрутки потока происходит при увеличении угла наклона закручивающих лопаток, в динамических сепараторах – при увеличении скорости вращения ротора. Снижение силы аэродинамического сопротивления во всех типах сепараторов происходит при увеличении высоты зоны разделения. Каждый из способов влияния на граничный размер имеет принципиальные ограничения.

Установка лопаток в статическом сепараторе под углом более 60° приводит к значительному росту аэродинамического сопротивления лопаточного аппарата, вследствие чего возрастают протечки газа между лопатками и наружной стенкой сепаратора, снижается закрутка потока, соответственно увеличивается граничный размер разделения и угрубляется мелкий продукт (готовая пыль) сепаратора.

При увеличении скорости вращения ротора в динамических сепараторах возрастают аэродинамическое сопротивление аппарата и потребляемая мощность привода ротора, что требует применения

более мощных вентиляторов и электродвигателей. Кроме того, в промышленных сепараторах с диаметрами роторов более 2 м высокие скорости вращения вызывают значительные динамические нагрузки на узлы подшипника и конструктивные элементы зоны классификации, приводящие к преждевременному износу сепараторов.

Хотя увеличение высоты зоны разделения снижает среднюю радиальную скорость газа в зоне и тем самым уменьшает влияние силы аэродинамического сопротивления на траекторию частиц, при относительной высоте зоны $H/D > 0,5$ в верхних углах и нижней части центра зоны образуются застойные области. Поток перестает быть плоскопараллельным, при этом локальные радиальные скорости газа снижаются незначительно, но существенно ухудшается эффективность разделения.

Влияние неидеальности разделения в качестве ограничения на предельную тонкость готовой пыли проявляется неявным образом, но именно это ограничение является принципиальным и не может быть устранено только изменением режимных параметров без изменения конструкции сепаратора.

Особенности этого ограничения рассмотрим на расчетном примере. Процесс разделения пыли в сепараторе описывается системой балансовых уравнений. Массовая доля (полный вынос) мелкого продукта составляет

$$\bar{\varphi} = \int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} \varphi_{\delta}(\xi) f_0(\xi) d\xi, \quad (1)$$

где $f_0(\xi)$ – плотность распределения частиц по размерам в подаваемом в сепаратор материале; δ_{\min} , δ_{\max} – минимальный и максимальный размеры частиц; ξ – текущий размер.

Плотность распределения частиц в мелком (готовая пыль) и крупном (возврат) продуктах равна соответственно:

$$f_{\text{мел}}(\xi) = \frac{\varphi_{\delta}(\xi) f_0(\xi)}{\bar{\varphi}}, \quad (2)$$

$$f_{\text{крп}}(\xi) = \frac{[1 - \varphi_{\delta}(\xi)] f_0(\xi)}{1 - \bar{\varphi}}. \quad (3)$$

Дисперсный состав пыли чаще характеризуется интегральным показателем – значением полных остатков $R(\delta)$, представляющих долевое или процентное содержание частиц крупнее некоторого контрольного размера δ_k . Кривые полных остатков в долевом выражении для подаваемого в сепаратор материала и мелкого и крупного продуктов разделения определяются выражениями:

$$R_0(\delta) = \int_{\delta}^{\delta_{\max}} f_0(\xi) d\xi; \quad (4)$$

$$R_{\text{мел}}(\delta) = \frac{1}{\bar{\varphi}} \int_{\delta}^{\delta_{\max}} \varphi_{\delta}(\xi) f_0(\xi) d\xi; \quad (5)$$

$$R_{\text{крп}}(\delta) = \frac{1}{1 - \bar{\varphi}} \int_{\delta}^{\delta_{\max}} [1 - \varphi_{\delta}(\xi)] f_0(\xi) d\xi. \quad (6)$$

Кривая разделения сепаратора достаточно хорошо аппроксимируется двухпараметрической зависимостью

$$\varphi_{\delta}(\xi) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\xi}{\delta_{\text{гр}}}\right)^{ks}}, \quad (7)$$

где ks – параметр, определяющий эффективность разделения. При $ks = 0$ происходит идеальное деление исходного продукта без классификации по размерам, при $ks \rightarrow \infty$ происходит идеальная классификация, когда все частицы мельче граничного размера попадают в мелкий продукт разделения, а все частицы крупнее граничного – в крупный продукт.

На рис. 1 показано семейство кривых разделения для ряда значений параметра ks . Промышленные сепараторы обладают эффективностью, соответствующей $ks = 1,3-3$.

Параметры $\delta_{\text{гр}}$ и ks зависят от конструкции сепаратора и режима его работы, при этом величина $\delta_{\text{гр}}$ может целенаправленно меняться за счет выбора соответствующего расхода воздуха или положения регулирующих органов, а параметр ks является неуправляемым.

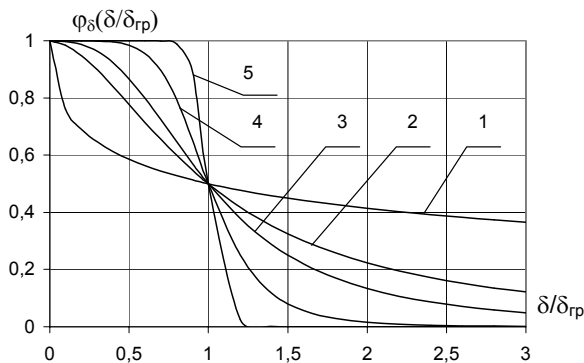


Рис. 1. Безразмерные кривые разделения сепаратора: 1 – $ks = 0,5$; 2 – $ks = 1,8$; 3 – $ks = 2,7$; 4 – $ks = 6$; 5 – $ks = 20$

Предположим, что на вход сепаратора подается исходная пыль с дисперсным составом, характеризующимся остатками на ситах 200, 90 и 40 мкм: $R_{200} = 8,5\%$; $R_{90} = 38,6\%$; $R_{40} = 65,7\%$. Расчеты по (1), (5), (7), представленные на рис. 2, 3, показывают, что в сепараторах с постоянным значением ks уменьшение граничного размера $\delta_{\text{гр}}$ приводит к получению более мелкой пыли. Более эффективный сепаратор пропускает в готовую пыль меньшее количество частиц крупнее граничного размера, поэтому при разделении по одной и той же границе сепаратор выделяет более мелкую пыль, но полный вынос $\bar{\varphi}$ несколько снижается.

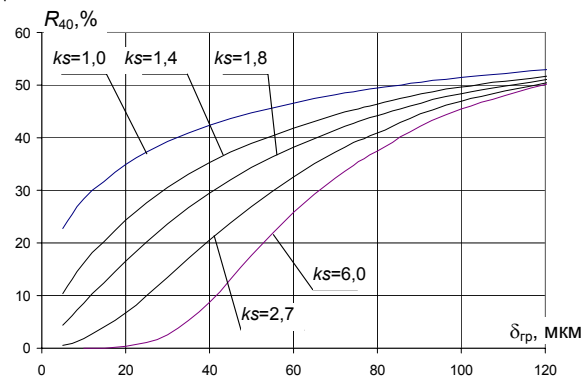


Рис. 2. Зависимость содержания в готовой пыли частиц крупнее 40 мкм от граничного размера разделения сепаратора

Если требуется получить пыль с заданным содержанием частиц крупнее контрольного размера, то более эффективный сепаратор может быть настроен на большую границу разделения, что приведет к увеличению выноса $\bar{\varphi}$ и производительности установки. Преимущество более эффективного сепаратора проявляется тем сильнее, чем мельче готовая пыль.

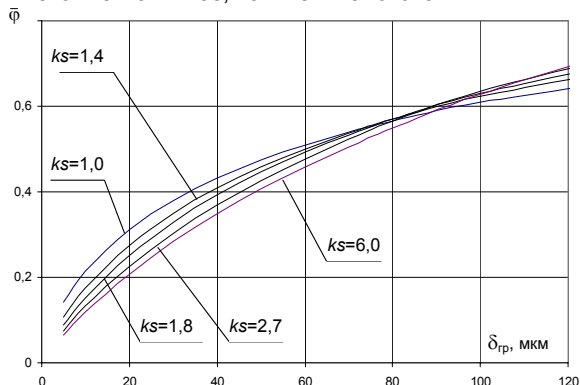


Рис. 3. Зависимость доли выхода готовой пыли от граничного размера разделения сепаратора

На рис. 4 показана зависимость доли выхода готовой пыли от содержания в ней частиц крупнее 40 мкм. Для получения пыли с $R_{40} = 10\%$ сепаратор с $ks=1,8$ должен быть настроен на границу $\delta_{гр} = 11,8$ мкм, при этом доля выхода готовой пыли составит $\bar{\varphi} = 0,171$. Сепаратор с $ks = 2,7$ настраивается на $\delta_{гр} = 25,1$ мкм, а доля выхода увеличивается более чем на 50% и составляет $\bar{\varphi} = 0,267$. Менее эффективный сепаратор, с $ks = 1,4$, при $\delta_{гр} = 4,7$ мкм обеспечивает почти вдвое меньший вынос $\bar{\varphi} = 0,100$.

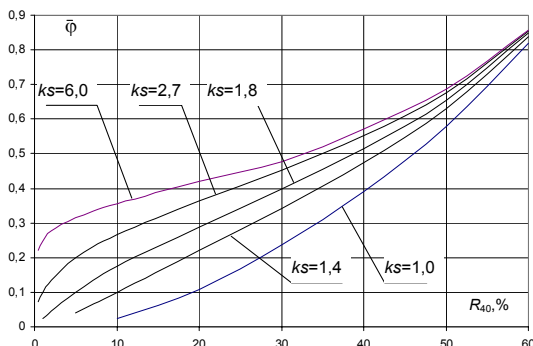


Рис. 4. Зависимость доли выхода готовой пыли от процентного содержания в ней частиц крупнее 40 мкм

При получении более крупной пыли с $R_{40}=30\%$ влияние эффективности разделения заметно снижается: сепараторы с $ks = 1,4; 1,8$ и $2,7$ должны быть настроены на границы соответственно $\delta_{гр}=28,9; 40,9$ и $54,7$ мкм, при этом выход готовой пыли составит $\bar{\varphi} = 0,342; 0,398$ и $0,454$. При получении пыли с $R_{40}>50\%$ преимущество более эффективных сепараторов становится практически незаметным.

Каждая из известных конструкций сепараторов обладает высокой эффективностью разделения только внутри некоторого диапазона изменения граничного размера. При выходе за пределы этого диапазона эффективность разделения заметно снижается, так как при снижении крутки возрастает неравномерность газового потока по высоте зоны, а при увеличении крутки возрастает интенсивность турбулентных пульсаций. В наибольшей степени этот эф-

фект проявляется при получении микропорошков, когда необходимо проводить разделение по границе в несколько микрон.

Для оценки влияния снижения эффективности разделения при уменьшении границы разделения на дисперсный состав пыли были проведены расчеты, в которых параметр ks изменялся в соответствии с формулой

$$ks = ks_{\text{опт}} \left[1 - \alpha \left(\frac{\delta_{гр} - \delta_{гр, \text{опт}}}{\delta_{гр, \text{опт}}} \right)^2 \right], \quad (8)$$

где $ks_{\text{опт}} = 2,7$ и $\delta_{гр, \text{опт}} = 60$ мкм. Параметр α определяет интенсивность снижения эффективности разделения при отклонении граничного размера от оптимального. Графически зависимость (8) представлена на рис. 5.

При $\alpha = 0$ эффективность разделения сепаратора остается постоянной и равной $ks = 2,7$ во всем диапазоне изменения $\delta_{гр}$, при $\alpha = 0,8$ и $\delta_{гр} = 5$ мкм эффективность снижается до $ks = 0,885$. При значениях $0 < \alpha$ эффективность разделения сепаратора занимает промежуточное значение.

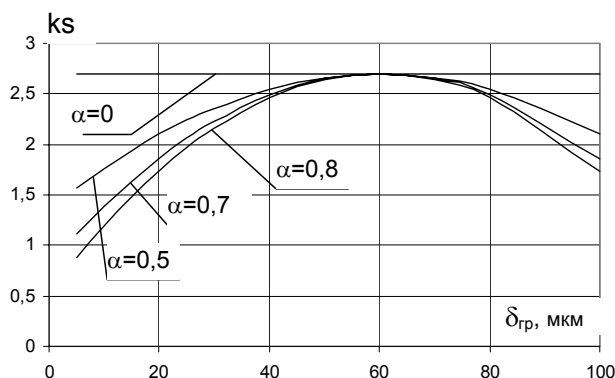


Рис. 5. Зависимость параметра эффективности от граничного разделения сепаратора

На рис. 6 представлены зависимости тонкости готовой пыли от граничного размера разделения в сепараторе с изменяющимся по (8) параметром ks . При $\alpha = 0$, т.е. при постоянной эффективности разделения, теоретически можно добиться любой тонкости пыли, уменьшая границу разделения вплоть до нуля. Однако при этом также к нулю будет стремиться выход готовой пыли. Зависимость доли выхода готовой пыли от границы разделения представлена на рис. 7.

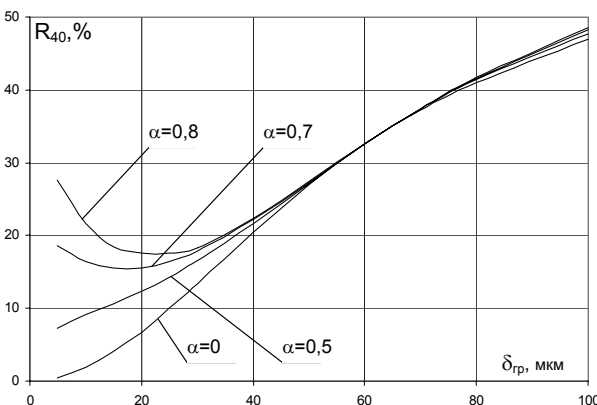


Рис. 6. Зависимость тонкости готовой пыли от граничного разделения сепаратора

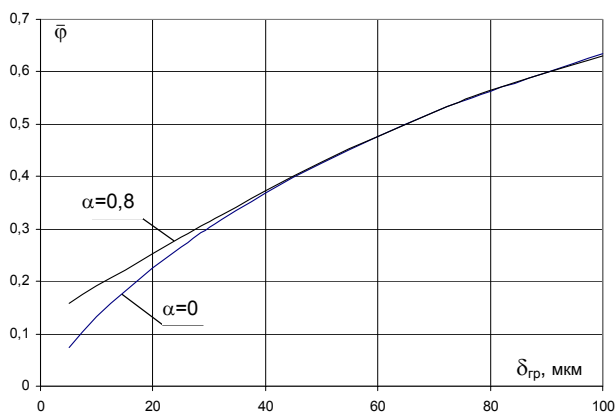


Рис. 7. Зависимость доли выхода готовой пыли от граничного размера разделения сепаратора

Однако при монотонном и одновременном снижении эффективности и границы разделения готовая пыль после достижения минимальной крупности начинает укрупняться. Это явление было замечено при экспериментальном исследовании модели динамического сепаратора Леше.

Применительно к тестовому примеру для $\alpha = 0,7$ невозможно получить пыль с $R_{40} < 15,5\%$ при настройке сепаратора на любую границу разделения. При более интенсивном падении эффективности разделения ($\alpha = 0,8$) предельная тонкость готовой пыли характеризуется величиной $R_{40} = 17,6\%$, которая наступает при $\delta_{гр} = 20-25$ мкм. Дальнейшее утонение пыли возможно только за счет снижения крупности подаваемого в сепаратор материала или применения сепаратора с большей эффективностью разделения.

Наличие предельного значения тонкости готовой пыли приводит к тому, что более крупную пыль можно получить при настройке сепаратора на различные границы разделения. В частности, для тестового примера при $\alpha = 0,8$ пыль с $R_{40} = 20\%$ можно

получить, настроив сепаратор на границу 12 мкм или 35 мкм. Однако в первом случае доля выхода готовой пыли составит 0,2, а во втором – 0,35. Разделение по более крупной границе позволяет почти вдвое увеличить производительность установки (рис. 8).

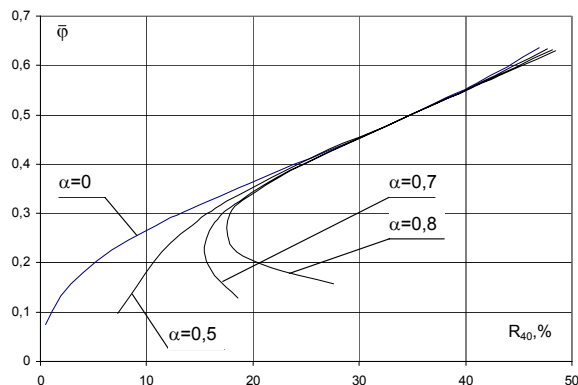


Рис. 8. Зависимость доли выхода готовой пыли от ее тонкости

Возможность появления отмеченных эффектов следует учитывать при выборе конструкции сепараторов на стадии проектирования и режимов работы установки при наладке системы пылеприготовления.

Список литературы

1. Ушаков С.Г., Зверев Н.И. Инерционная сепарация пыли. – М.: Энергия, 1974. – 169 с.
2. Росляк А.Т., Бирюков Ю.А., Пачин В.Н. Пневматические методы и аппараты порошковой технологии. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1990. – 272 с.
3. Loesche mills for the comminution clinker and blast-furnace slag and for mineral processing. Dr. Heinz. 10th European Symposium on Comminution. 2nd – 5th September 2002, Heidelberg, Germany.