

ПОДБОР ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ КЛАССИФИКАТОРОВ ДЛЯ РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

А. А. Гарабжю

Белорусский государственный технологический университет

Рассмотрены методики расчета и оптимизации конструктивно-технологических параметров центробежного и гравитационно-каскадного классификаторов. Проведен сравнительный анализ результатов оптимизации данных классификаторов. Установлен наиболее эффективный тип воздушного классификатора для совместной работы с роторно-центробежной мельницей.

В настоящее время процессы разделения зернистых материалов на фракции используются во многих отраслях промышленности и в сельском хозяйстве. Например, процессы воздушной классификации сыпучих материалов широко распространены в химической и горнорудной промышленности, в производстве строительных материалов и т.п.

Однако существует ряд причин, которые сдерживают широкое промышленное применение воздушных классификаторов.

Первая причина – это весьма распространенное представление о сравнительно низкой эффективности работы воздушных классификаторов. Данное представление сложилось в связи с тем, что длительное время в промышленности применялись примитивные конструкции аппаратов, процесс классификации в которых был организован далеко не самым лучшим образом по принципу уравнивания частиц граничной крупности потоком разделительной среды. Этот принцип разделения зерен основан на теоретическом подходе, принимающем за модель процесса фракционирования движение единичного зерна материала в воздушной среде. Между тем возможности воздушной классификации не исчерпываются только этим принципом, о чем

свидетельствуют результаты некоторых экспериментальных работ, в которых удалось значительно повысить эффективность разделения. Достигнутая интенсификация процесса в этих работах опирается не на четкие теоретические предпосылки, а получена эмпирически.

Второй причиной является широко бытующее убеждение, что воздушные классификаторы, особенно гравитационного типа, должны иметь большую высоту. Это убеждение исходит из теоретических представлений, согласно которым четкое разделение зерен материала по крупности должно осуществляться в условиях ламинарного движения потока разделяющей среды. Отсюда -- стремление к увеличению протяженности рабочей зоны классификатора для достижения частицами материала установившихся скоростей движения. Однако современное состояние прикладной аэродинамики и накопившиеся экспериментальные данные ставят применительно к дисперсионным потокам под сомнение правильность такого положения.

Третьей причиной является отсутствие научно обоснованных методов расчета классификаторов и критериев для объективного сравнения разделительной способности различных аппаратов. Это приводит к тому, что для каждого конкретного случая в различных отраслях промышленности создаются свои аппараты, копирующие существующие принципы организации процесса классифи-

E-mail: Garazh@tut.by

кации. Сравнение их с другими аппаратами с целью выбора наиболее рациональных решений затруднено из-за различных характеристик классифицируемых материалов и многочисленных несогласованных показателей и индексов классификации, применяющихся для оценки качества разделения зернистого материала по крупности [1].

В связи с этим, в настоящее время, очень актуальным является вопрос оптимизации конструктивно-технологических параметров воздушных классификаторов, применяемых в процессах тонкого измельчения сыпучих материалов. Наличие стройной методики расчета и оптимизации основных параметров воздушных классификаторов позволило бы быстро подобрать наиболее эффективный тип классификатора для конкретного промышленного измельчителя. Основной целью данной работы является практическое разрешение этой проблемы на примере подбора того или иного типа воздушного классификатора для роторно-центробежной мельницы. Конструктивные особенности и принцип действия энергосберегающей роторно-центробежной мельницы подробно рассмотрены в работах [2, 3].

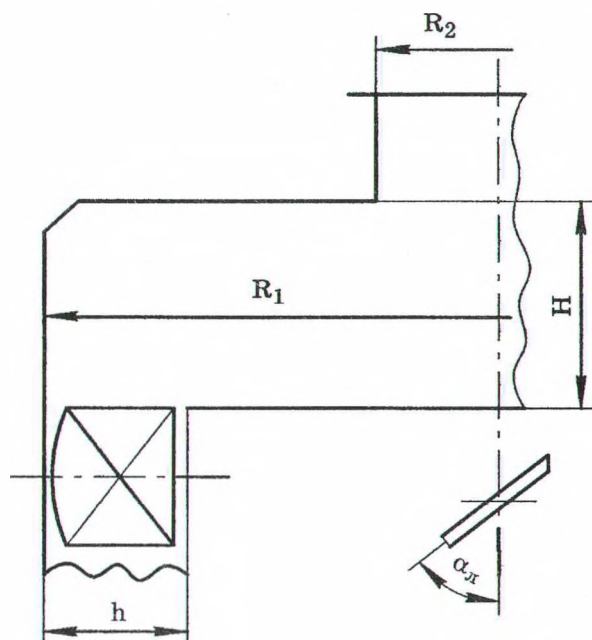


Рис. 1. Расчетная схема центробежной зоны классификации.

Проанализируем существующие методы расчета и оптимизации основных параметров центробежных и гравитационно-каскадных классификаторов.

Метод расчета и оптимизации центробежных классификаторов

Поскольку кривые разделения предоставляют достаточно полную информацию о процессе воздушной классификации сыпучих материалов, то основная цель (или задача) расчета любого классификатора заключается в построении кривой разделения (или в расчете ее отдельных характеристик) по известным конструктивным и режимным параметрам аппарата или же в определении оптимальных конструктивных и технологических параметров классификатора, обеспечивающих требуемое качество разделения измельченного продукта, что в свою очередь является наиболее интересным с практической точки зрения.

Рассмотрим метод расчета и оптимизации основных параметров центробежных классификаторов, основываясь на работе [4]. Расчетная схема центробежной зоны классификации представлена на рис. 1.

Предварительно определим детерминированную характеристику процесса классификации – размер частицы, находящейся в равновесии на внешнем радиусе центробежной зоны классификатора. Для этого можно воспользоваться следующей формулой:

$$\delta_{p1} = \left(\frac{3}{4} \cdot a \cdot \frac{R_1}{\operatorname{tg}^2 \alpha_1} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_{\text{ч}}} \cdot \frac{v^n}{W_{r1}^n} \right)^{1/(n+1)}, \quad (1)$$

где W_{r1} – радиальная скорость потока на внешнем радиусе вихря (R_1), м/с; a и n – величины, зависящие от зоны сопротивления: зона сопротивления Стокса: $Re \leq 1$; $a = 24$; $n = 1$; зона сопротивления Аллена: $1 < Re \leq 10^3$; $a = 13$; $n = 0.5$; зона сопротивления Ньютона: $Re > 10^3$; $a = 0.38$; $n = 0$; v – коэффициент вязкости среды; α_1 – относительный угол наклона лопаток, град.; $\rho_{\text{г}}$ – плотность воздуха, кг/м³; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частиц, кг/м³; R_1 – радиус центробежной зоны классификатора, м.

Выразим величины (W_{r1}) и ($\operatorname{tg} \alpha_1$) через расход газа (Q) и геометрические характеристики центробежной зоны классификации (рис. 1):

$$W_{r1} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot H}, \quad (2)$$

где Q – расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; H – высота центробежной зоны классификатора, м .

Закрутку потока на внешнем радиусе находим из выражения $\operatorname{tg} \alpha_1 = W_{\phi 1} / W_{r1}$. Окружная скорость ($W_{\phi 1}$) зависит от угла установки закручивающих лопаток (α_L) и расходной скорости в лопаточном канале (W_L).

$$W_{\phi 1} = W_L \cdot \operatorname{tg} \alpha_L = \frac{Q}{2\pi \cdot R_L \cdot h} \cdot \operatorname{tg} \alpha_L \approx \frac{Q}{2\pi \cdot R_1 \cdot h} \cdot \operatorname{tg} \alpha_L, \quad (3)$$

где R_L – средний радиус лопаточного канала, приближенно принимаемый радиусу R_1 , м ; h – высота лопатки, м ; α_L – угол наклона лопаток, град.

С учетом полученных зависимостей можно записать:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{H}{h} \cdot \operatorname{tg} \alpha_L. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что закрутка потока в центробежной зоне классификатора зависит не только от угла установки лопаток, но и от соотношения высоты зоны и ширины лопаточного канала. Подставляя выражения (3) и (4) в формулу (1), получим:

$$\delta_{p1} = \left(\frac{3 \cdot (2 \cdot \pi)^n}{4} \cdot \frac{av^n}{(\operatorname{tg} \alpha_L)^2} \times \right)^{1/(n+1)} \times \left(\frac{\rho_r}{\rho_v} \cdot \frac{h^2}{H^{2-n}} \cdot \frac{R_1^{n+1}}{Q^n} \right)^{1/(n+1)}. \quad (5)$$

Выразим все линейные размеры в долях радиуса (R_1):

$$\delta_{p1} = \left(\frac{3 \cdot (2 \cdot \pi)^n}{4} \cdot \frac{av^n}{(\operatorname{tg} \alpha_L)^2} \cdot \frac{\rho_r}{\rho_v} \cdot \frac{\bar{h}^2}{\bar{H}^{2-n}} \right)^{\frac{1}{n+1}} \cdot \left(\frac{R_1^{\frac{2 \cdot n + 1}{n+1}}}{Q} \right)^{\frac{n}{n+1}}. \quad (6)$$

На практике первичную оценку параметров классификации следует производить непосредственно по формуле (6), причем наиболее удовлетворительные результаты дает значение $n = 0.5$, соответствующее закону сопротивления Аллена. При этом формула (6) принимает вид:

$$\delta_{p1} = \left(24.4 \cdot \frac{\sqrt{v}}{\operatorname{tg}^2 \alpha_L} \cdot \frac{\rho_r}{\rho_v} \cdot \frac{\bar{h}^2}{\bar{H}^{3/2}} \right)^{2/3} \cdot \frac{R_1^{4/3}}{Q^{1/3}}. \quad (7)$$

При проверочном расчете допускающими варьирование величинами являются угол поворота лопаток (α_L) и расход воздуха (Q). В отношении угла следует заметить, что его увеличение более $60-70^\circ$ нецелесообразно, так как из-за значительного отставания потока и перетоков по зазорам между лопатками и корпусом фактическая крутка не растет,

а аэродинамическое сопротивление аппарата резко повышается. При прикидочных расчетах следует выбирать угол равный $40-50^\circ$ с тем, чтобы на практике скорректировать неизбежные погрешности расчета.

При выборе расхода воздуха (Q) следует учитывать два ограничения. Первое ограничение обусловлено допустимым с точки зрения эффективности значением исходной концентрации твердого материала. Второе ограничение выбора Q – оптимизация аэродинамического режима классификации.

Определяемый по формуле (7) размер частиц не вполне отражает все параметры центробежной зоны разделения. Например, в выражение для его расчета не входят относительный радиус выходного патрубка ($\bar{R}_2$), определяющий протяженность вихревой зоны, и степень «непотенциальности» вихря (k), отражающая темп затухания закрутки потока по ра-

диусу зоны. Поэтому в качестве характерного можно рекомендовать размер частицы, равновесной для среднегеометрического радиуса зоны разделения, который рассчитывается по формуле:

$$\delta_{\text{р.ср}} = \delta_{\text{р1}} \cdot \bar{R}_2^{\frac{2 \cdot k - 0.5}{3}}. \quad (8)$$

Степень непотенциальности вихря (k) зависит от концентрации материала в газе. Согласно экспериментальным данным на чистом газе она составляет 0.7–0.8; даже при очень малых (около 0.05 кг/кг) концентрациях материала ее величина снижается до 0.5–0.6 и при дальнейшем повышении концентрации остается практически постоянной. Поэтому в расчетах можно рекомендовать использовать значение $k = 0.6$. Отношение радиусов в формуле не следует рассматривать как средство достижения особо тонких границ разделения, так как при $R_2/R_1 < 0.25$ резко искажается структура вихря и снижается эффективность разделения.

Сложнее дело обстоит с определением граничного размера в случае отвода грубого продукта разделения по внешней стенке лопаточного канала. Из формулы (7) видно, что равновесный размер убывает с ростом расхода (Q), хотя и незначительно. Это значит, что увеличивается доля грубого продукта, отводимого через лопаточный канал навстречу потоку с возросшим расходом, который стремится вынести его обратно в зону разделе-

ния. Здесь граничный размер формируется в результате противоположных по направлению процессов движения возврата и пневмотранспорта.

Таким образом, при проверочном расчете на заданный или определенный из дополнительных условий расход газа формула (7) позволяет с учетом (8) оценить граничный размер классификации. При конструкторском расчете аппарата на заданный граничный размер существует множество комбинаций $\bar{h}$, $\bar{H}$, $\bar{R}_2$, R_1 и Q , обеспечивающих требуемый результат. Обычно можно варьировать значения R_1 и Q , а величины $\bar{h}$ и $\bar{R}_2$ следует принимать фиксированными: первую – из условия размещения лопаток равной 0.2–0.3, вторую – из условия сохранения квазиплоской структуры потока равной 0.25–0.4.

Непосредственный расчет оптимальных параметров центробежного классификатора при его установке на роторно-центробежной мельнице [2] выполнялся с использованием ЭВМ. Основные результаты расчета оптимальных параметров центробежного классификатора представлены на рис. 2 ÷ 5.

Согласно графическим зависимостям $\delta_{\text{р.ср}} = f(H)$, приведенным на рис. 2, можно отметить, что с увеличением высоты центробежной зоны классификатора (H), при $\alpha_{\text{л}} = \text{const}$, диаметр равновесной частицы резко уменьшается. Однако, при $H = 0.36–0.48$ м, диаметр равновесной частицы уменьшается не столь

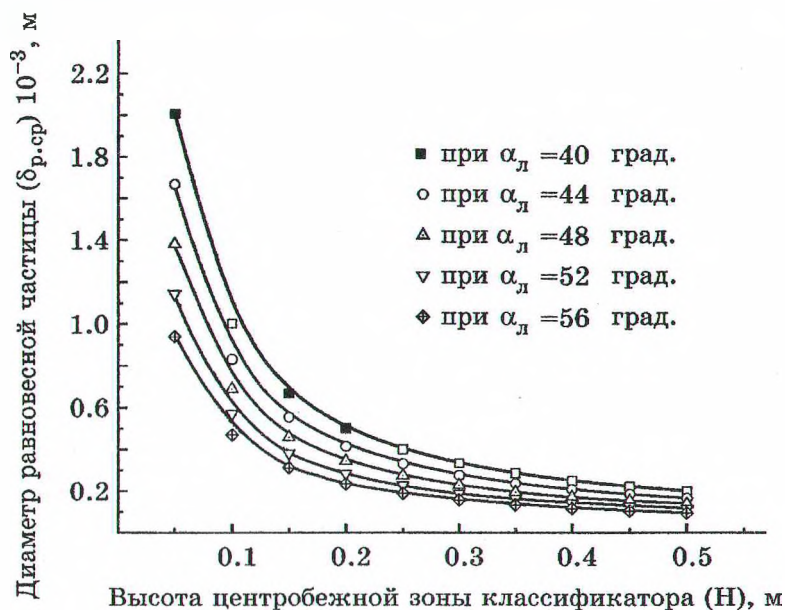


Рис. 2. Зависимость диаметра равновесной частицы ($\delta_{\text{р.ср}}$) от высоты центробежной зоны классификатора (H), при постоянном угле поворота лопаток $\alpha_{\text{л}} = \text{const}$.

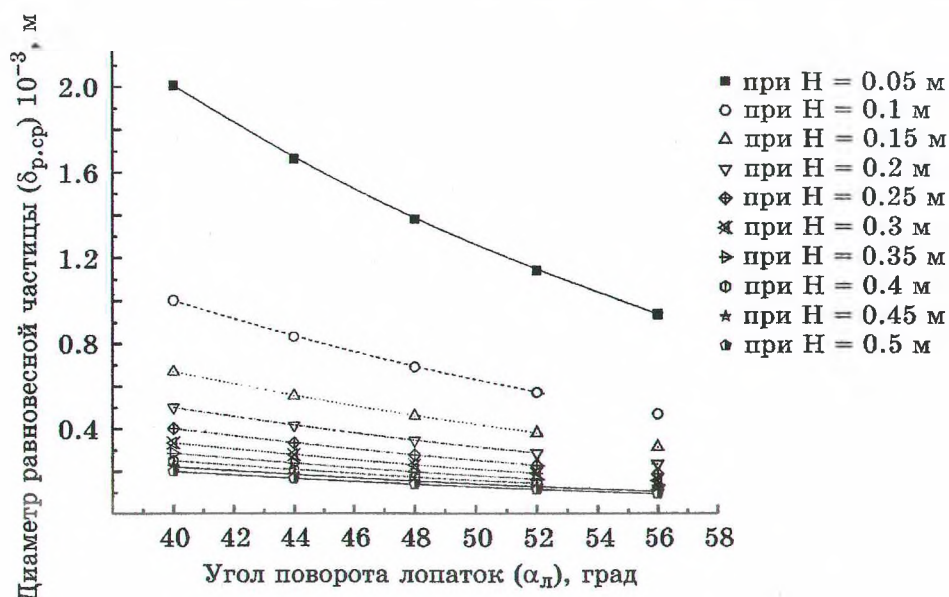


Рис. 3. Зависимость диаметра равновесной частицы ($\delta_{p,ср}$) от угла поворота лопаток ($\alpha_л$), при постоянной высоте центробежной зоны классификатора $H = \text{const}$.

значительно и стремится к горизонтали. Поэтому в качестве оптимальной можно рекомендовать высоту центробежной зоны классификатора в пределах 0.36–0.48 м.

Аналогичная тенденция прослеживается на рис. 3, где представлены графические зависимости $\delta_{p,ср} = f(\alpha_л)$, при $H = \text{const}$. При увеличении угла поворота лопаток ($\alpha_л$) диаметр равновесной частицы также уменьшается и постепенно стремится к горизонтали. При этом, с увеличением высоты центробежной зоны

классификатора кривые $\delta_{p,ср} = f(\alpha_л)$ становятся более пологими. Это говорит об уменьшении влияния угла ($\alpha_л$) на величину ($\delta_{p,ср}$) при больших значениях высоты (H). При $H = 0.36\text{--}0.48$ м можно порекомендовать использовать угол поворота лопаток $\alpha_л = 45\text{--}50^\circ$.

Согласно графическим зависимостям $\delta_{p,ср} = f(Q)$, приведенным на рис. 4, с увеличением расхода воздуха (Q), при $\alpha_л = \text{const}$, диаметр равновесной частицы резко уменьшается. Однако при $Q = 0.35\text{--}0.45$ м³/с, диаметр равновесной частицы уменьшается не столь зна-

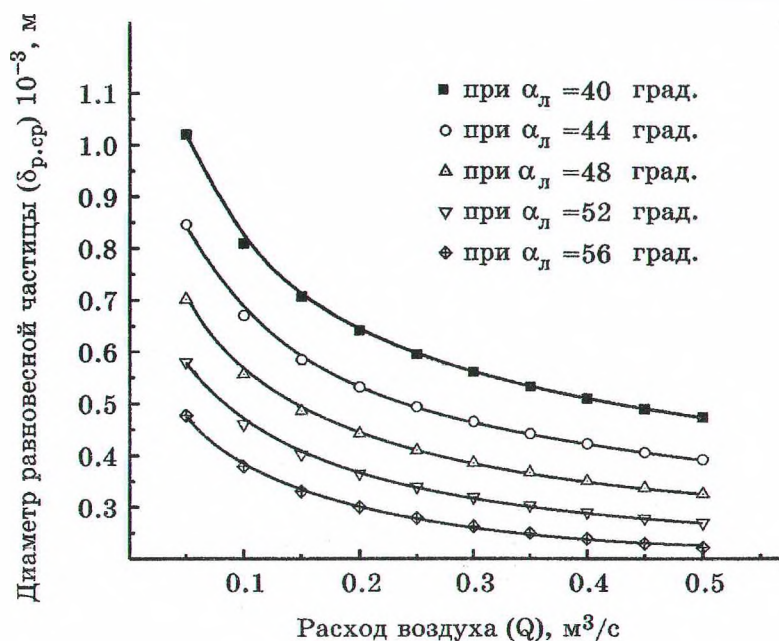


Рис. 4. Зависимость диаметра равновесной частицы ($\delta_{p,ср}$) от расхода воздуха (Q), при постоянном угле поворота лопаток $\alpha_л = \text{const}$.

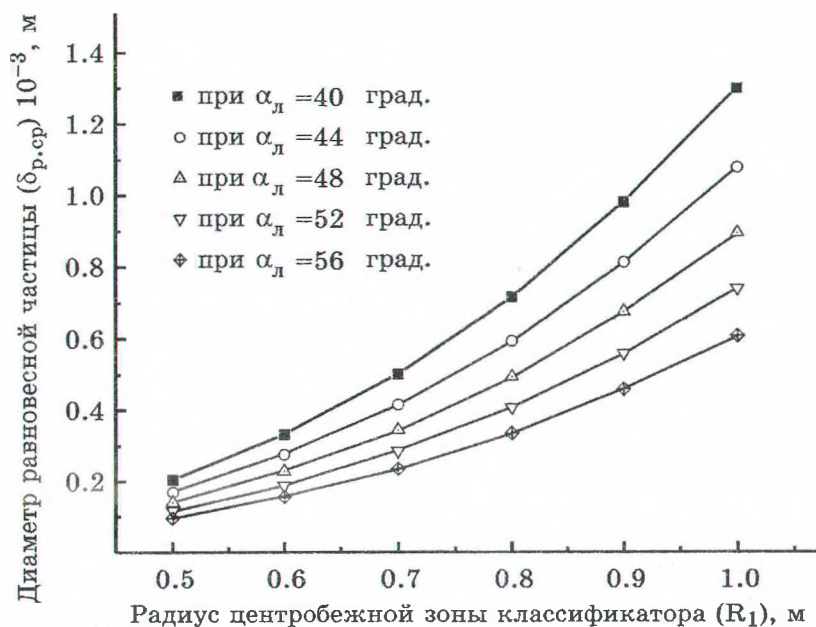


Рис. 5. Зависимость диаметра равновесной частицы ($\delta_{p,ср}$) от радиуса центробежной зоны классификатора (R_1), при постоянном угле поворота лопаток $\alpha_L = \text{const.}$

чительно и стремится к горизонтали. Поэтому в качестве оптимального можно рекомендовать расход газа в классификаторе в пределах $0.35 - 0.45 \text{ м}^3/\text{с}$.

Противоположная тенденция прослеживается на рис. 5, где представлены графические зависимости $\delta_{p,ср} = f(R_1)$, при $\alpha_L = \text{const.}$ При увеличении радиуса центробежной зоны классификатора диаметр равновесной частицы резко увеличивается и постепенно стремится к вертикали. При этом с увеличением угла поворота лопаток кривые $\delta_{p,ср} = f(R_1)$ становятся более пологими. Это говорит об уменьшении влияния радиуса (R_1) на величину ($\delta_{p,ср}$) при больших значениях угла (α_L). Так как увеличивать радиус центробежной зоны классификатора до бесконечности нецелесообразно, то для полупромышленного образца роторно-центробежной мельницы с радиусом ротора $0.5 - 0.6 \text{ м}$ [2], при $\alpha_L = 45 - 50^\circ$, можно порекомендовать использовать радиус $R_1 = 0.55 - 0.75 \text{ м}$.

Исходя из анализа графических зависимостей, представленных на рис. 2 ÷ 5, можно отметить, что непосредственный выбор оптимальных параметров центробежного классификатора должен производиться по граничному классу разделяемого материала и с учетом конструктивно-технологических параметров измельчающего оборудования. Кроме того, в процессе оптимизации может иметь место большое количество совокупностей оптимальных параметров классификато-

ра, обеспечивающих требуемое качество разделения. При этом выбор совокупности оптимальных параметров должен осуществляться таким образом, чтобы на практике скорректировать неизбежные погрешности расчета.

Для полупромышленного образца роторно-центробежной мельницы с радиусом ротора $0.5 - 0.6 \text{ м}$ [2] и граничного зерна разделения частиц гипсового камня равного 0.3 мм , можно предложить центробежный классификатор со следующими оптимальными параметрами: $Q = 0.35 \div 0.45 \text{ м}^3/\text{с}$; $H = 0.36 \div 0.48 \text{ м}$; $z = 6$; $\alpha_L = 45 \div 50^\circ$; $R_1 = 0.55 \div 0.75 \text{ м}$; $R_2 = 0.3 \cdot R_1 = 0.165 \div 0.225 \text{ м}$; $h = 0.25 \cdot R_1 = 0.138 \div 0.188 \text{ м}$.

Метод расчета и оптимизации гравитационно-каскадных классификаторов

Рассмотрим метод расчета и оптимизации основных параметров гравитационно-каскадного классификатора, основываясь на работах [1, 5]. В качестве исходных данных для расчета воспользуемся гранулометрическим составом измельчения гипсового камня в роторно-центробежной мельнице [2], представленным в одноименной таблице.

Расчетная схема гравитационно-каскадного классификатора представлена на рис. 6.

Данную задачу можно решить путем подбора числа ступеней гравитационно-каскадного классификатора. Принимаем аппарат с симметричным средним вводом материала. Для нахождения

Таблица. Гранулометрический состав измельчения гипсового камня.

Средний диаметр фракции материала, мм	Выход фракции, %
0.1	46.8
0.175	11.6
0.225	9.5
0.275	8.5
0.3	5.4
0.425	5.3
0.6	6.4
0.8	4.4
1.05	2.1

оптимальной высоты классификатора рассчитываем степень фракционного извлечения частиц всех узких классов крупности по следующей формуле:

$$\Phi(x) = K^{i^*} \cdot \frac{K^{z+1-i} - (1-K)^{z+1-i^*}}{K^{z+1} - (1-K)^{z+1}}, \quad (9)$$

где $\Phi(x)$ – степень фракционного извлечения для класса пыли со средним размером (x); z – число секций классификатора, шт.; i^* – номер секции аппарата, считая сверху, на которую подается исходный материал; i – номер секции классификатора, считая сверху, на которой определяется степень фракционного извлечения; K – коэффициент распределения.

$$K = \frac{r_z}{r_{zu}}, \quad (10)$$

где r_z – исходное содержание частиц узкого класса крупности на z -ой ступени перемешивания; r_{zu} – количество частиц этого же класса крупности, переходящих с z -ой ступени на ступень $z-1$.

Методом последовательных приближений определяем число ступеней аппарата при вводах материала на различные ступени классификатора и некоторых скоростях воздушного потока.

Коэффициенты распределения различных монофракций можно найти по графическим зависимостям, представленным на рис. 7.

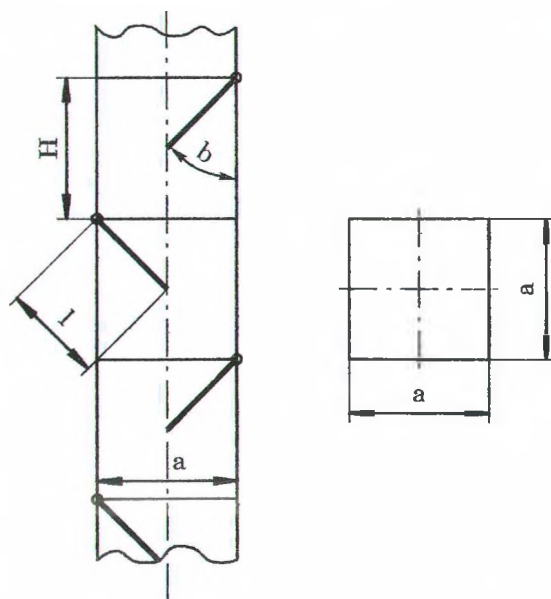


Рис. 6. Расчетная схема гравитационно-каскадного классификатора.

Критерий Фруда можно определить по формуле:

$$Fr = \frac{\omega^2}{g \cdot d}, \quad (11)$$

где ω – скорость воздушного потока в аппарате, м/с; d – средний диаметр частиц определенного класса, м.

Определив степень фракционного извлечения, рассчитываем показатель эффективности по критерию Ханнока. Для этого можно воспользоваться следующей формулой:

$$E = \frac{\sum_{x_{100}}^{x_{50}} \Phi_m(x) \cdot r_{ucx}(x)}{\sum_{x_{100}}^{x_{50}} r_{ucx}(x)} - \frac{\sum_{x_{50}}^{x_0} \Phi_m(x) \cdot r_{ucx}(x)}{\sum_{x_{50}}^{x_0} r_{ucx}(x)}, \quad (12)$$

где $r_{исх}(x)$ – процентное содержание частиц узкого класса в исходном порошке; $x_{50} \div x_{100}$ – фракции, унесенные газовым потоком; $x_{50} \div x_0$ – фракции, прошедшие в нижнюю часть сепаратора.

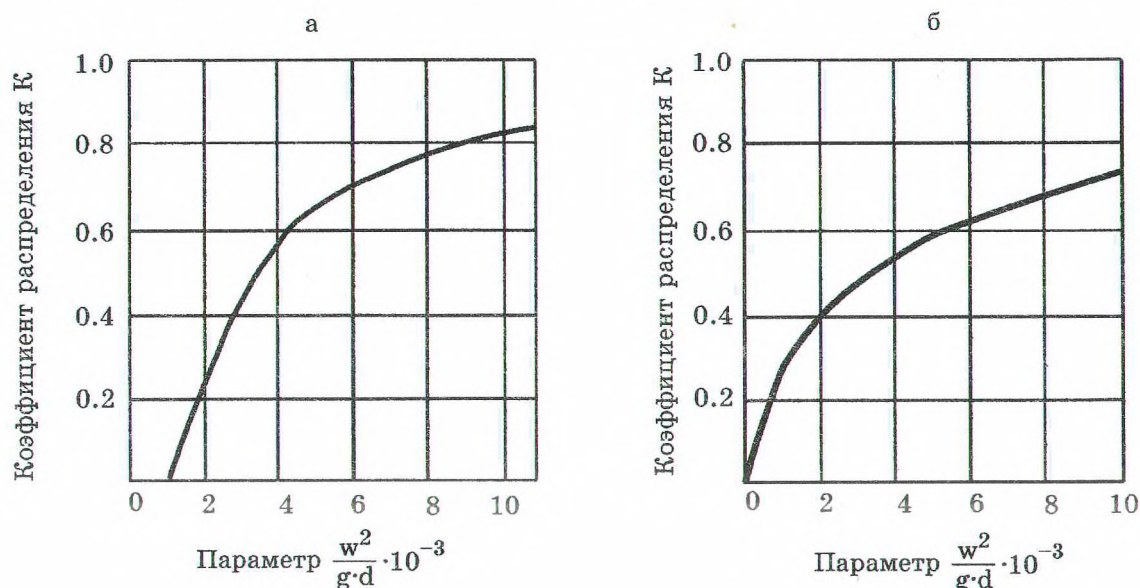


Рис. 7. Зависимость коэффициента распределения от критерия Фруда при верхней подаче материала в аппарат (а) и при симметричной средней подаче материала в аппарат (б).

Таким образом, (x_{50}) – это граничная фракция материала, половина ее уносится воздушным потоком, а другая половина попадает в нижнюю часть сепаратора. Эта фракция принимается в зависимости от требований, предъявляемых к конечному продукту классификации.

Сравнив показатели эффективности для различных параметров процесса классификации, мы можем определить оптимальные размеры классификатора для разделения порошка данного фракционного состава. Площадь проходного сечения аппарата определяется по формуле:

$$F_{np} = \frac{V}{3600 \cdot \omega}, \quad (13)$$

где V – расход воздуха через проходное сечение аппарата, м³/с.

Принимая аппарат квадратного сечения, можно определить размеры классификатора в поперечнике:

$$a^2 = 2 \cdot F_{np} = F, \quad a = \sqrt{2 \cdot F}; \quad (14)$$

где a – длина стороны сечения классификатора, м; F – полное сечение классификатора, м².

Как было показано выше (см. рис. 6), секции гравитационно-каскадного классификатора снабжаются пересыпными полками прямоугольного сечения, расположенные под углом $\beta = 45^\circ$ к вертика-

ли. Длину полки (L) можно найти по следующей формуле:

$$L = \frac{a}{2 \cdot \cos \beta} = \frac{a}{\sqrt{2}}. \quad (15)$$

Тогда высота одной секции аппарата (H) будет равна:

$$H = \frac{a}{2} \cdot \operatorname{tg} \beta = \frac{a}{2}. \quad (16)$$

Непосредственный расчет оптимальных параметров гравитационно-каскадного классификатора, при его совместной работе с роторно-центробежной мельницей [2], выполнялся с использованием ЭВМ. Основные результаты расчета оптимальных параметров гравитационно-каскадного классификатора представлены на рис. 8 ÷ 10.

Анализируя графические зависимости, представленные на рис. 8 ÷ 10, можно отметить следующее. Для обеспечения достаточно эффективного процесса классификации частиц гипсового камня заданного гранулометрического состава (измельчение материала производилось в роторно-центробежной мельнице с радиусом ротора 0.5 м [2]) с граничным размером зерна 0.3 мм, можно предложить гравитационно-каскадный классификатор со следующими оптимальными параметрами: $V = 0.42$ м³/с; $\omega = 1.8$ м/с; $z = 9$; $i^* = 9$; $F_{np} = 0.233$ м²; $a = 0.683$ м;

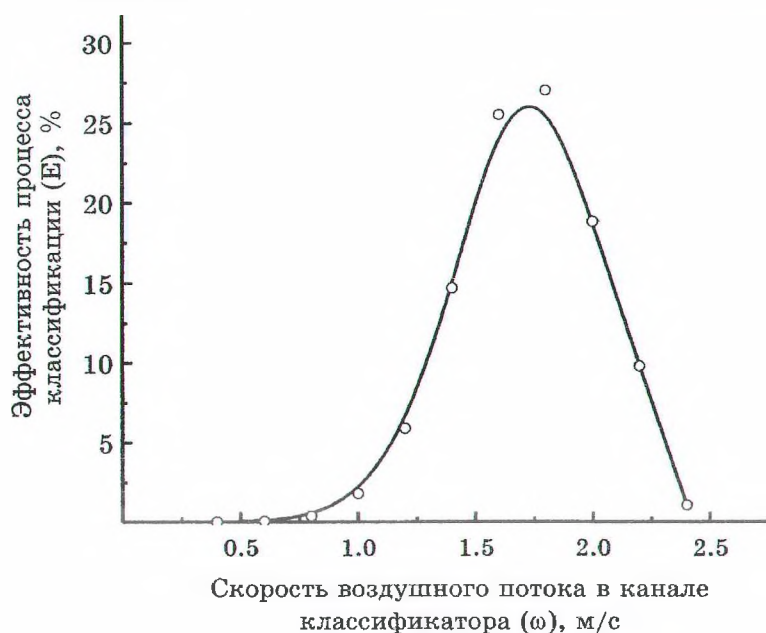


Рис. 8. Зависимость эффективности процесса классификации (E) от скорости воздушного потока (ω) в канале аппарата.

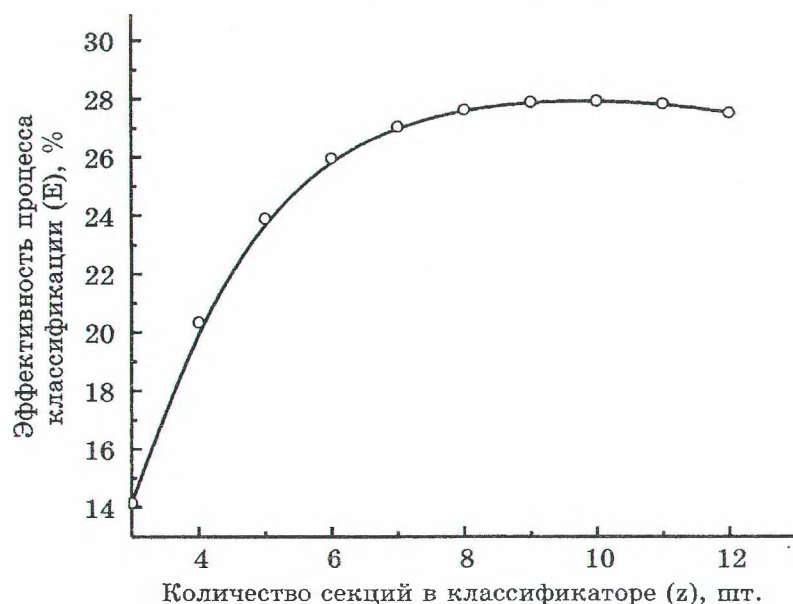


Рис. 9. Зависимость эффективности процесса классификации (E) от количества секций аппарата (z).

$L = 0.483$ м; $H = 0.342$ м. При этом эффективность классификации данного сепаратора составит $E = 27 \div 34$ %, а общая высота аппарата $H_{об} = H \cdot z = 0.342 \cdot 9 = 3.078$ м.

Сравнивая результаты расчета и оптимизации конструктивно-технологических параметров центробежного и гравитационно-каскадного классификаторов, можно отметить следующее. Для полупромышленного образца роторно-центробежной мельницы с радиусом ротора 0.5 м [2] и граничного зерна разделения частиц гипсового камня равного 0.3 мм, наиболее предпочтительным по эффективности разделения и конструктив-

но-технологическим параметрам является центробежный классификатор со следующими оптимальными характеристиками: $Q = 0.35 \div 0.45$ м³/с; $H = 0.36 \div 0.48$ м; $z = 6$; $\alpha_d = 45 \div 50^\circ$; $R_1 = 0.55 \div 0.75$ м; $R_2 = 0.165 \div 0.225$ м; $h = 0.138 \div 0.188$ м. Принимая во внимание сложность протекания процесса воздушной классификации сыпучих материалов и невозможность учета всех его нюансов, выше упомянутые параметры центробежного классификатора могут быть использованы только на первой стадии его проектирования и подбора и нуждаются в последующей экспериментальной или промышленной корректировке.

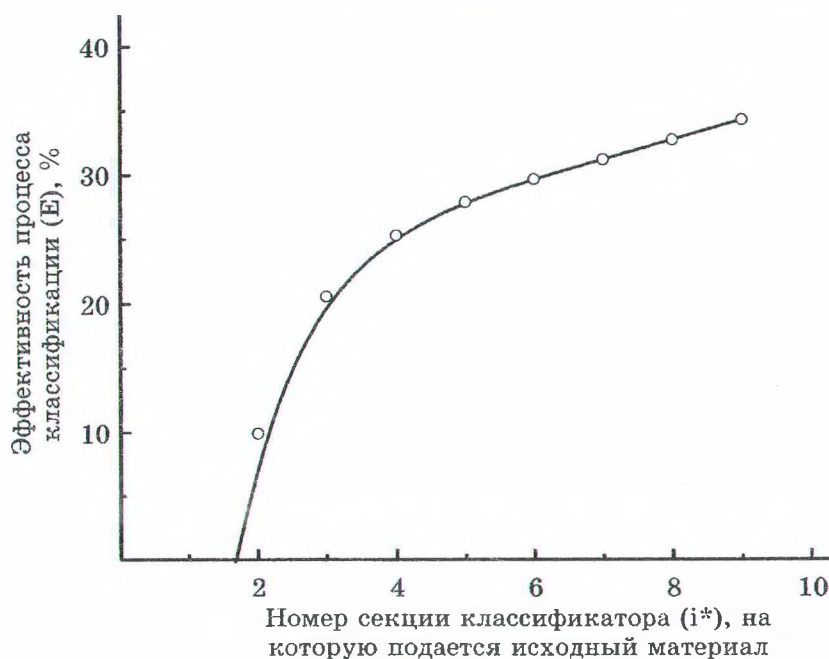


Рис. 10. Зависимость эффективности процесса классификации (E) от номера секции (i^*), на которую подается исходный материал.

Библиография

1. Барский М. Д. Оптимизация процессов разделения зернистых материалов. // М., Химия, 1978, 368 с.
2. Патент РБ № 4707. Мельница / Левданский А. Э., Гарабажиу А. А., Левданский Э. И., Левданский С. Э. 5 с.
3. А. А. Гарабажиу, В. Ю. Мурог. Теоретические исследования процессов измельчения и классификации сыпучих материалов в роторно-центробежной мельнице. // Хим. пром., 2003, № 5, с. 3-11.
4. Мизонов В. Е., Ушаков С. Г. Аэродинамическая классификация порошков. // М., Химия, 1989, 160 с.
5. Барский М. Д. Фракционирование порошков. // М., Химия, 1980, 321 с.