

А.А. Гарабажиу, ассистент; Л.В. Новосельская, доцент

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ВОЗДУШНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

In given article questions of optimization of processes of air classification of loose materials in centrifugal and cascade classifiers are considered.

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 [1, 2]. Основной целью данной работы является практическое разрешение этой проблемы на примере подбора того или иного типа воздушного классификатора для роторно-вихревой мельницы.

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

### 1. Метод расчета и оптимизации центробежных классификаторов

Рассмотрим метод расчета и оптимизации основных параметров центробежных классификаторов, основываясь на работе [3]. Расчетная схема центробежной зоны классификации представлена на рис. 1.

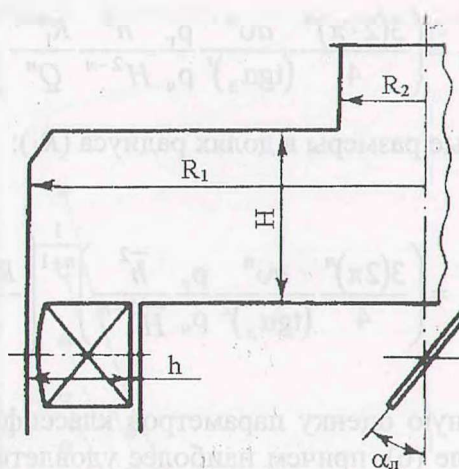


Рис. 1. Расчетная схема центробежной зоны классификации

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

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

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 –  $Re > 10^3$ ;  $a = 0,38$ ;  $n = 0$ ;  $\nu$  – коэффициент вязкости среды;  $\alpha_1$  – относительный угол наклона лопаток, град.;  $\rho_r$  – плотность воздуха,  $кг/м^3$ ;  $\rho_c$  – плотность частиц,  $кг/м^3$ ;  $R_1$  – радиус центробежной зоны классификатора, м.

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

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

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

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

$$W_{\phi 1} = W_n tg\alpha_n = \frac{Q}{2\pi R_n h} tg\alpha_n \approx \frac{Q}{2\pi R_1 h} tg\alpha_n, \quad (3)$$

где  $R_n$  – средний радиус лопаточного канала, приближенно принимаемый равным радиусу  $R_1$ , м;  $h$  – высота лопатки, м;  $\alpha_n$  – угол наклона лопаток, град.

С учетом полученных зависимостей можно записать

$$tg\alpha_1 = \frac{H}{h} tg\alpha_n. \quad (4)$$

Подставляя выражения (3) и (4) в формулу (1), получим

$$\delta_{p1} = \left( \frac{3(2\pi)^n}{4} \frac{a\nu^n}{(tg\alpha_n)^2} \frac{\rho_r}{\rho_c} \frac{h^2}{H^{2-n}} \frac{R_1^{n+1}}{Q^n} \right)^{1/(n+1)} \quad (5)$$

Выразим все линейные размеры в долях радиуса ( $R_1$ ):

$$\delta_{p1} = \left( \frac{3(2\pi)^n}{4} \frac{a\nu^n}{(tg\alpha_n)^2} \frac{\rho_r}{\rho_c} \frac{\bar{h}^2}{\bar{H}^{2-n}} \right)^{1/n+1} \left( \frac{R_1^{2-n+1}}{Q} \right)^{1/n+1} \quad (6)$$

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:

$$\delta_{p1} = \left( 24,4 \frac{\sqrt{\nu}}{tg^2\alpha_n} \frac{\rho_r}{\rho_c} \frac{\bar{h}^2}{\bar{H}^{3/2}} \right)^{2/3} \frac{R_1^{4/3}}{Q^{1/3}} \quad (7)$$

При проверочном расчете допускающими варьирование величинами являются угол поворота лопаток ( $\alpha_n$ ) и расход воздуха ( $Q$ ). 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 радиусу зоны. Поэтому в качестве характерного можно рекомендовать размер частицы, равновесной для среднегеометрического радиуса зоны разделения, который рассчитывается по формуле

$$\delta_{p, \text{ср}} = \delta_{p1} \bar{R}_2^{\frac{2k-0,5}{3}}. \quad (8)$$

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  $k = 0,6$ .

Таким образом, при проверочном расчете на заданный или определенный из дополнительных условий расход газа формула (7) позволяет с учетом (8) оценить граничный размер классификации.

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

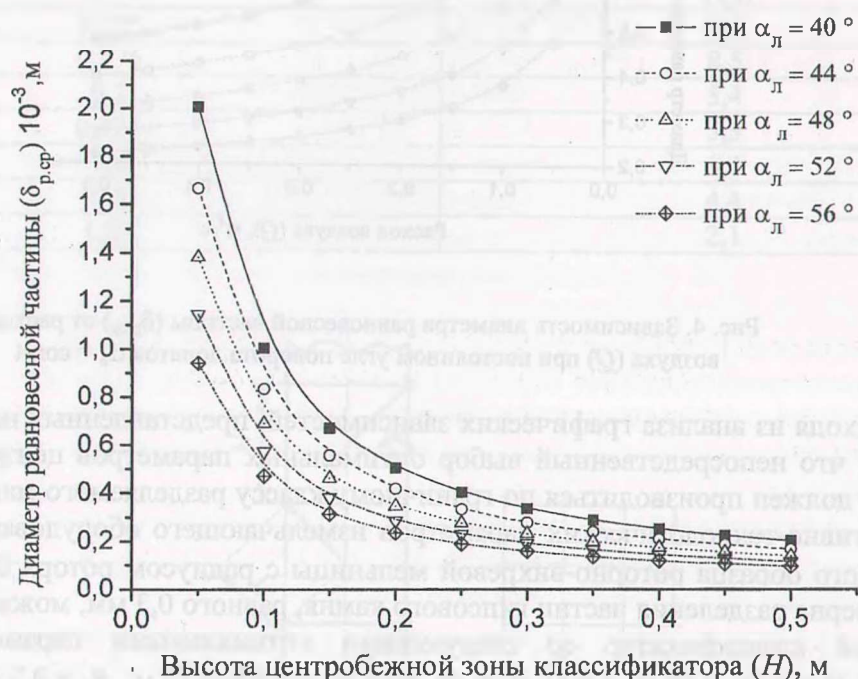


Рис. 2. Зависимость диаметра равновесной частицы ( $\delta_{p, \text{ср}}$ ) от высоты центробежной зоны классификатора ( $H$ ), при постоянном угле поворота лопаток  $\alpha_{\text{л}} = \text{const}$

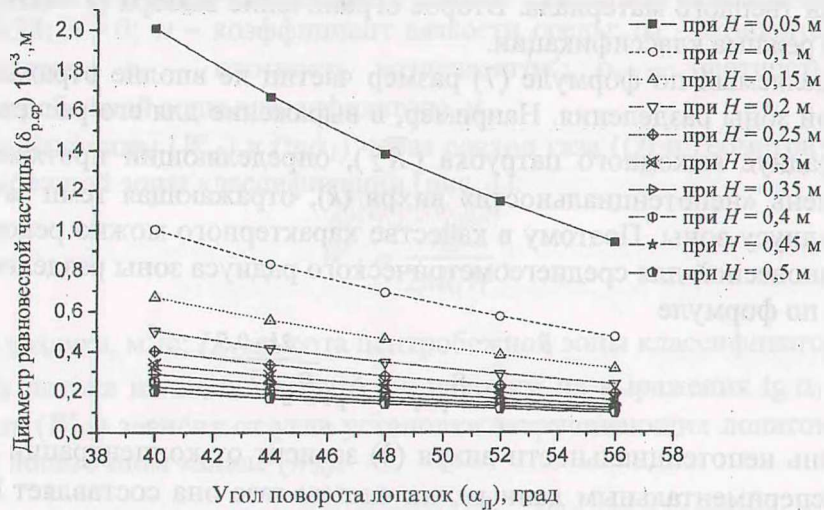


Рис. 3. Зависимость диаметра равновесной частицы ( $\delta_{p,ср}$ ) от угла поворота лопаток ( $\alpha_{л}$ ) при постоянной высоте центробежной зоны классификатора  $H = \text{const}$

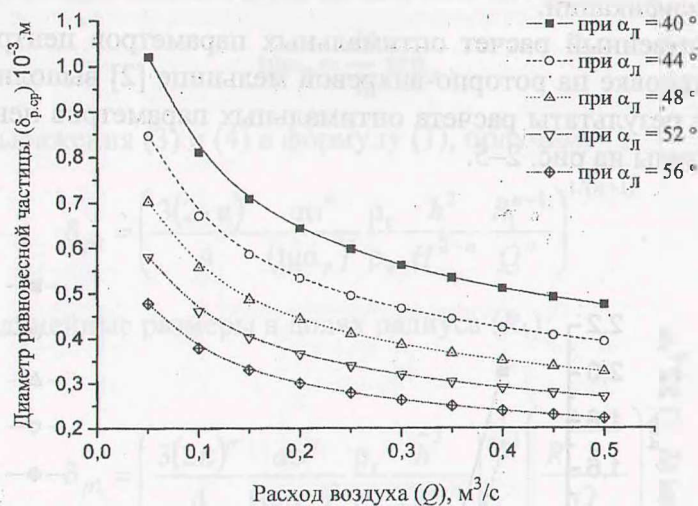


Рис. 4. Зависимость диаметра равновесной частицы ( $\delta_{p,ср}$ ) от расхода воздуха ( $Q$ ) при постоянном угле поворота лопаток  $\alpha_{л} = \text{const}$

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. Для полупромышленного образца роторно-вихревой мельницы с радиусом ротора 0,5–0,6 м [2] и граничного зерна разделения частиц гипсового камня, равного 0,3 мм, можно предложить центробежный классификатор со следующими оптимальными параметрами:  $Q = 0,35\text{--}0,45 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $H = 0,36\text{--}0,48 \text{ м}$ ;  $z = 6$ ;  $\alpha_{л} = 45\text{--}50^\circ$ ;  $R_1 = 0,55\text{--}0,75 \text{ м}$ ;  $R_2 = 0,3 \cdot R_1 = 0,165\text{--}0,225 \text{ м}$ ;  $h = 0,25 \cdot R_1 = 0,138\text{--}0,188 \text{ м}$ .

## 2. Метод расчета и оптимизации гравитационно-каскадных классификаторов

Рассмотрим метод расчета и оптимизации основных параметров гравитационно-каскадного классификатора, основываясь на работах [1, 4]. В качестве исходных данных

для расчета, воспользуемся гранулометрическим составом измельчения гипсового камня в роторно-вихревой мельнице [2], представленным в табл. Расчетная схема гравитационно-каскадного классификатора представлена на рис. 6.

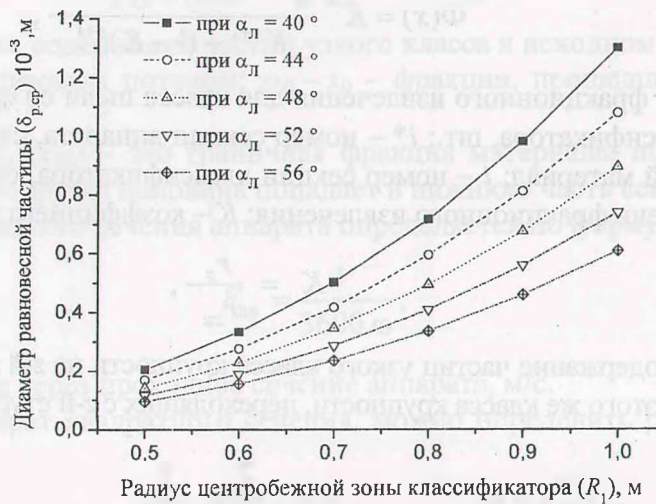


Рис. 5. Зависимость диаметра равновесной частицы ( $\delta_{р.ср}$ ) от радиуса центробежной зоны классификатора ( $R_1$ ) при постоянном угле поворота лопаток  $\alpha_l = \text{const}$

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

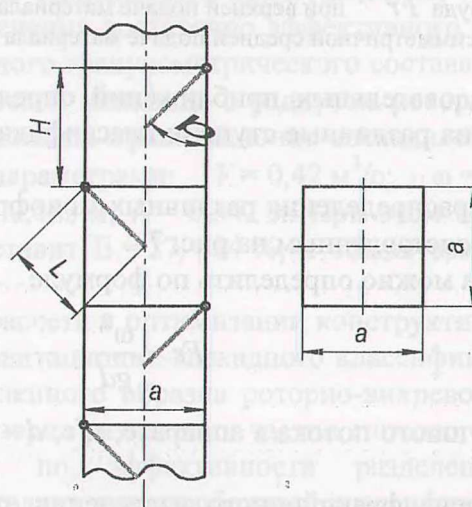


Рис. 6. Расчетная схема гравитационно-каскадного классификатора

Данную задачу можно решить путем подбора числа ступеней гравитационно-каскадного классификатора. Принимаем аппарат с симметричным средним вводом материала. Для нахождения оптимальной высоты классификатора рассчитываем степень фракционного извлечения частиц всех узких классов крупности по следующей формуле:

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

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.

$$K = \frac{r_z}{r_{z1}}, \quad (10)$$

где  $r_z$  – исходное содержание частиц узкого класса крупности на  $z$ -й ступени пересортики;  $r_{z1}$  – количество частиц этого же класса крупности, переходящих с  $z$ -й ступени на ступень  $z-1$ .

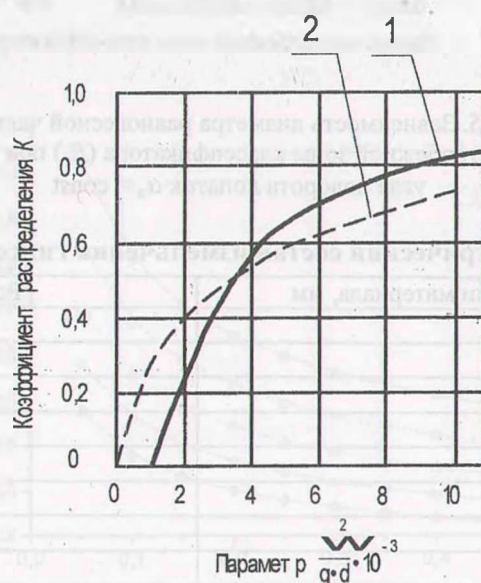


Рис. 7. Зависимость коэффициента распределения от критерия Фруда  $Fr^{-1}$  при верхней подаче материала в аппарат (а) и при симметричной средней подаче материала в аппарат (б)

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.

Критерий Фруда можно определить по формуле

$$Fr = \frac{\omega^2}{gd}, \quad (11)$$

где  $\omega$  – 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:

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

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

Таким образом, ( $x_{50}$ ) – это граничная фракция материала, половина ее уносится воздушным потоком, а другая половина попадает в нижнюю часть сепаратора.

Площадь проходного сечения аппарата определяется по формуле

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

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

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

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

где  $a$  – длина стороны сечения классификатора, м;  $F$  – полное сечение классификатора, м<sup>2</sup>.

Как было показано выше (см. рис. 6), секции гравитационно-каскадного классификатора снабжаются пересыпными полками прямоугольного сечения, расположены под углом  $\beta = 45^\circ$  к вертикали. Длину полки ( $L$ ) можно найти по следующей формуле:

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

Тогда высота одной секции аппарата ( $H$ ) будет равна

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

Непосредственный расчет оптимальных параметров гравитационно-каскадного классификатора при его совместной работе с роторно-вихревой 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-вихревой мельнице с радиусом ротора 0,5 м [2]) с граничным размером 0,3 мм можно предложить гравитационно-каскадный классификатор со следующими оптимальными параметрами:  $V = 0,42$  м<sup>3</sup>/с;  $\omega = 1,8$  м/с;  $z = 9$ ;  $i^* = 9$ ;  $F_{пр} = 0,233$  м<sup>2</sup>;  $a = 0,683$  м;  $L = 0,483$  м;  $H = 0,342$  м. При этом эффективность классификации данного сепаратора составит  $E = 27 - 34$  %, а общая высота аппарата  $H_{об} = Hz = 0,342 \cdot 9 = 3,078$  м.

Сравнивая результаты расчета и оптимизации конструктивно-технологических параметров центробежного и гравитационно-каскадного классификаторов, можно отметить следующее. Для полупромышленного образца роторно-вихревой 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 конструктивно-технологическим параметрам является центробежный классификатор со следующими оптимальными характеристиками:  $Q = 0,35 - 0,45$  м<sup>3</sup>/с;  $H = 0,36 - 0,48$  м;  $z = 6$ ;  $\alpha_n = 45 - 50^\circ$ ;

$R_1 = 0,55-0,75$  м;  $R_2 = 0,165-0,225$  м;  $h = 0,138-0,188$  м. В связи с высокой сложностью процесса воздушной классификации и невозможностью учета всех его нюансов, вышеупомянутые параметры центробежного классификатора могут использоваться только на первой стадии его проектирования и подбора и нуждаются в экспериментальной или промышленной корректировке.

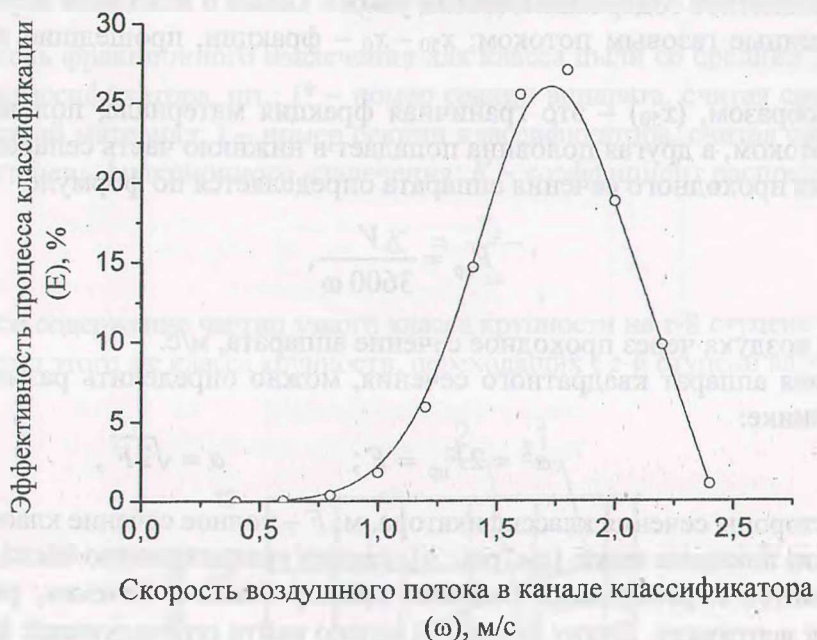


Рис. 8. Зависимость эффективности процесса классификации (E) от скорости воздушного потока (ω) в канале аппарата

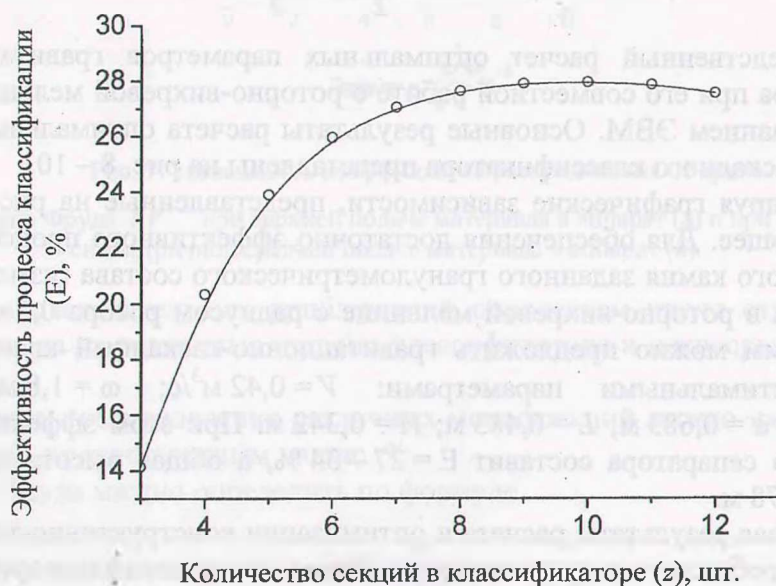


Рис. 9. Зависимость эффективности процесса классификации (E) от количества секций аппарата (z)



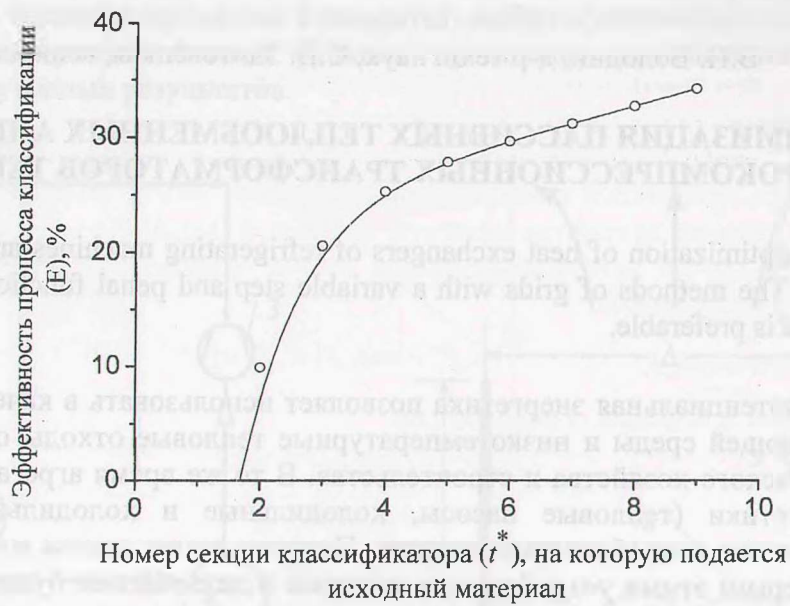


Рис. 10. Зависимость эффективности процесса классификации (E) от номера секции ( $i^*$ ), на которую подается исходный материал

### ЛИТЕРАТУРА

1. Барский М.Д. Оптимизация процессов разделения зернистых материалов. — М.: Химия, 1978. — 368 с.
2. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация порошков. — М.: Химия, 1989. — 160 с.
3. Барский М.Д. Фракционирование порошков. — М.: Химия, 1980. — 321 с.