

*А.Н. Баранов, д.т.н., проф.  
Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков  
Р. И. Рыбалко, к.т.н., доц.  
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка*

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ НОВОГО ДВУХСТАДИЙНОГО ВОЗДУШНОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ СУХОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ЗАМКНУТОМ ЦИКЛЕ**

*Наведено результати досліджень залежності ефективності роботи нового двостадійного повітряного сепаратора для сухого подрібнення у замкнутому циклі. Запропоновані нові підходи до створення сепараторів для розділення полідисперсних систем в турбулентному потоці. Дані рекомендації для створення нових та реконструкції існуючих сепараторів для підвищення їх ефективності.*

*Ключові слова: устаткування сортування, сепаратор, подрібнення, турбулентний потік.*

*Приведены результаты исследований зависимости эффективности работы нового двухстадийного воздушного сепаратора для сухого измельчения в замкнутом цикле. Предлагаются новые подходы к созданию сепараторов для разделения полидисперсных систем в турбулентном потоке. Даны рекомендации для создания новых и реконструкции существующих сепараторов для повышения их эффективности.*

*Ключевые слова: устройства сортирования, сепаратор, измельчение, турбулентный поток.*

*The article presents the results of the efficiency correlation study of the two-stage air separator for dry grinding in the closed cycle. The new approaches are offered for creating separators for polydisperse systems separation in turbulent flow. Recommendations are given for creating new and reconstructing the existing separators for rising their efficiency.*

*Key words: sorting equipment, separator, grinding, turbulent flow.*

**Постановка проблеми.** Своевременное удаление готового продукта из зоны измельчения за счет воздушной сортировки позволяет значительно повысить эффективность помола в агрегатах замкнутого цикла и позволяет обеспечить заданную степень измельчения материала.

Воздушная сортировка производится в устройствах и машинах различной конструкции, которые применяются для обеспечения работы помольных машин при производстве цемента, гипса, извести и других материалов (в замкнутом цикле) и при сочетании помола с сушкой. Однако

работа воздушных сепараторов характеризуется низкой эффективностью сортировки и большой засоренностью фракций.

В настоящее время не имеется такого воздушного сепаратора, который хотя бы приблизительно соответствовал всем предъявляемым к нему требованиям.

Эти требования заключаются, прежде всего, в следующем:

- резкая верхняя граница тонкого продукта;
- отсутствие «влетающих» частиц;
- жесткая характеристика, т. е. независимость установленной границы разделения от количества загружаемого материала;
- сепаратор должен легко приспособливаться к специальным требованиям в отношении классификации независимо от особенностей мельницы.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Главным решением для эффективной классификации в сепараторе является обеспечение для заданного диаметра равновесных частиц необходимых параметров однородности турбулентного потока и предельных размеров вихрей за счет установки решеток для разрушения крупномасштабных турбулентных структур [1]. Однако присутствие в потоке частиц значительно превышающих размер равновесных частиц приводит к созданию турбулентного следа за ними во время движения в потоке, что резко снижает эффективность работы решеток. Для повышения эффективности классификации в зоне точного разделения на первом этапе предлагается установить экран под определенным углом атаки на пути двухфазного турбулентного потока, частично перекрывающий газоход. Мелкие частицы, время релаксации которых невелико, будут огибать экран вместе с потоком воздуха, и уходить во вторую ступень сепаратора на точное разделение. Крупные частицы и агломераты будут ударяться об экран. В результате удара об экран агломератов произойдет их разрушение, и мелкие частицы будут подхвачены потоком воздуха и доставлены во вторую ступень сепаратора. Крупные частицы после удара об экран, отражаются от него и попадают в зону осаждения.

Создание сепаратора новой конструкции [2] позволило значительно повысить эффективность разделения газодисперсного потока за счет использования трех принципиально новых решений:

- осаждения крупной фракции в первой ступени;
- разрушения агломератов из мелких частиц и отделение их от общего потока на входе во вторую ступень;
- повышения турбулентной однородности во второй ступени точного разделения.

В новом двухступенчатом сепараторе на первом этапе из двухфазного потока выделяются частицы твердой фракции, диаметр которых превышает равновесные частицы более чем в 4-5 раз и

отправляются на домол. Во второй ступени производится точное разделение, где размер равновесной частицы соответствует заданному значению. Такое решение в несколько раз снижает циркуляционную нагрузку во второй ступени сепаратора и предотвращает появления в нем крупных вихрей турбулентного следа.

**Формулирование целей статьи.** Несмотря на многолетние исследования, общей теории турбулентности пока не существует, и ряд параметров турбулентных процессов определяются экспериментально. В частности, теория суперпозиции турбулентных струй после решетки находится в стадии разработки. Поэтому возникла необходимость проведения экспериментальных исследований по определению параметров сепаратора для обеспечения эффективной классификации.

**Изложение основного материала.** Исследования проводились в два этапа. Учитывая, что возможно использование второй ступени, как самостоятельной машины, на первом этапе были проведены исследования по определению влияния на процесс классификации в зоне разделения соотношения диаметра прутков решетки ( $D$ ) и расстояния между прутками ( $D_1$ ), т.е.  $D/D_1$ , величины границы разделения и скорости двухфазного потока. Решение поставленной задачи осуществлялось при использовании центрального ортогонального композиционного плана 2-го порядка. В качестве параметра оптимизации была принята эффективность сортировки  $Y_1$ , зависящая от следующих факторов:

$x_1$  – отношение  $D/D_1$ ;

$x_2$  – величина границы разделения, мкм;

$x_3$  – скорость двухфазного потока, м/с.

Звездное плечо для трех факторов центрального композиционного плана 2-го порядка  $d = 1,215$ .

Диапазоны варьирования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Диапазоны варьирования факторов

факторы	Значения факторов					
	-1,215	-1	0	1	1,215	$\Delta$
$x_1$	0,016	0,019	0,033	0,047	0,050	0,014
$x_2$	29,3	40	90	140	150,8	50
$x_3$	10,1	11	15	19	19,9	4

В результате обработки информации получено адекватное уравнение регрессии зависимости эффективности сортировки:

$$Y_1 = 87,61 + 1,18x_1 + 4,08x_2 + 0,87x_3 - 1,15x_1^2 - 0,88x_1x_2 + 0,2125x_1x_3 - 3,353x_2^2 + 0,625x_2x_3 + 0,0679x_3^2 \quad (1)$$

Для исключения систематических ошибок проведена рандомизация опыта по датчику случайных чисел. Однородность дисперсии проверялась по критерию Кохрена, что позволило сделать вывод о полноте факторов.

Проверка адекватности описания поверхностей отклика полиномом 2-й степени производилась по F-критерию Фишера:

$$F = \frac{S_{ад.}^2}{S_{воспр.}^2} = \frac{0,2016}{0,1217} = 1,657 < F_{табл.}$$

$$F_{табл.} = F_{(0,05; 5; 5)} = 5,05.$$

Графики зависимости  $Y_1$  от  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  приведены на рис. 1-3.

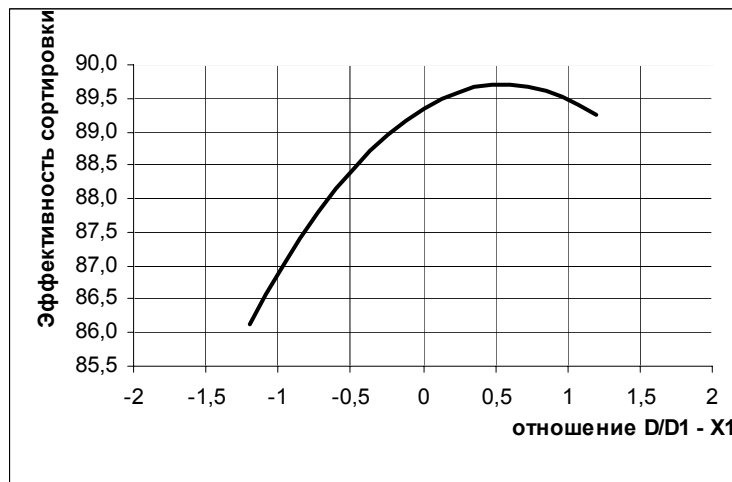


Рисунок 1 – Зависимость эффективности сортировки от отношения  $D/D1$

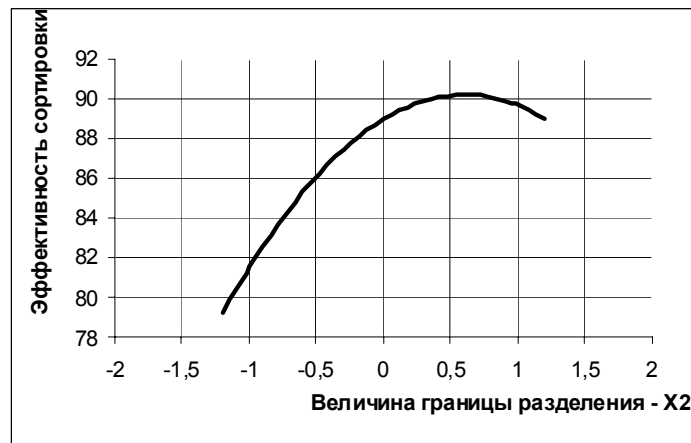


Рисунок 2 – Зависимость эффективности сортировки от границы разделения



Рисунок 3 – Зависимость эффективности сортировки от скорости потока

На втором этапе были проведены исследования эффективности работы двухстадийного воздушного сепаратора.

Главным показателем эффективности работы оборудования является эффективность сортировки ( $Y$ ).

Факторы, влияющие на эффективность сортировки, следующие:

$x_1$  ( $\alpha$ ) – угол поворота экрана, градусы;

$x_2$  ( $V$ ) – скорость двухфазного потока на входе первой ступени классификатора, м/с;

гранулометрический состав материала, поступающего на вход классификатора:

$x_3$  ( $b$ ) – 1-й коэффициент уравнения Розена-Раммлера,  $R(\delta) = e^{-b\delta^n}$ ;

$x_4$  ( $n$ ) – 2-й коэффициент уравнения Розена-Раммлера;

$x_5$  ( $\delta$ ) – величины границы разделения, мкм;

$x_6$  ( $\gamma$ ) – концентрация материала в двухфазном потоке, кг/м<sup>3</sup>.

Определение эффективности сортировки как функции от шести независимых факторов  $Y_2 = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$  проводились с использованием  $D$ –оптимального плана со звездными точками. Диапазоны варьирования переменными установлены на основании ранее проведенных экспериментов и приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Диапазоны варьирования переменными

Факторы		КОДОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ					$\Delta$
		-1,724	-1	0	+1	+1,724	
		НАТУРАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ					
$\alpha$	$x_1$	12,8	20	30	40	47,2	10
$V$	$x_2$	8,1	11	15	19	21,9	4
$b$	$x_3$	1800	4000	7000	10000	12200	3000
$n$	$x_4$	0,8	1,2	1,5	1,8	2,2	0,3
$\delta$	$x_5$	58	80	110	140	162	30
$\gamma$	$x_6$	0,197	0,24	0,3	0,36	0,403	0,06

Описание поверхности отклика в локальной области получено в результате реализации  $\frac{1}{2}$  реплики полного факторного эксперимента типа  $2^{6-1}$  при генерирующем соотношении  $x_6 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5$ .

Звездное плечо  $d = 1,724$ .

В результате математической обработки экспериментальных данных, получено адекватное уравнение регрессии зависимости эффективности сортировки от вышеперечисленных факторов.

$$\begin{aligned} Y_2 = & 84,49 + 1,18x_1 + 0,7x_2 + 3,88x_3 - 1,75x_4 + 0,14x_5 + \\ & + 2,83x_6 - 1,12x_1^2 + 0,06x_1x_3 + 0,06x_1x_4 - 0,006x_1x_5 + 0,04x_1x_6 - \\ & - 0,95x_2^2 - 0,02x_2x_3 - 0,02x_2x_4 + 0,04x_2x_5 - 0,006x_2x_6 - 2,29x_3^2 + (2) \\ & + 0,04x_3x_4 - 0,03x_3x_5 + 0,06x_3x_6 - 2,04x_4^2 - 0,03x_4x_5 + \\ & + 0,06x_4x_6 - 1,79x_5^2 - 0,95x_6^2. \end{aligned}$$

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{воспр}^2} = \frac{1,6067}{1,3164} = 1,2205 < F_{табл} \approx 1,7.$$

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** В результате анализа уравнений выявлены зависимости эффективности сортировки от отдельно взятых факторов, эффективность сортировки максимальная при:

- соотношении диаметра прутков решетки ( $D$ ) и расстояния между прутками ( $D_1$ ) должно быть 0,025;
- скорости двухфазного потока на входе в первую ступень 16-17м/с;
- гранулометрии материала, описываемой уравнением Розена-Раммлера с коэффициентами  $b = 9000$ ;  $n = 1,35$ ;
- величине границы разделения 115 мкм;
- концентрации материала в двухфазном потоке 0,38 кг/м<sup>3</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянова И.А. Снижение энергозатрат на помол строительных материалов в замкнутом цикле благодаря использованию сепаратора новой конструкции / И.А. Емельянова, А.Н. Баранов, Р.И. Рыбалко // Збірник наукових праць міжнародної наукової конференції «Проблеми економії енергії». – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2003. – С. 230–236.

2. Пат. № 18198, Україна МПК В02С 23/10 (2006.01). Двостадійний класифікатор сипучих матеріалів / Р.І. Рыбалко, А.М. Баранов – № и2006 09779; заявлено 12.09.06; опубл. 16.10.06, Бюл. № 10.