На правах рукописи

Пономарев Владимир Борисович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПНЕВМОКЛАССИФИКАЦИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В КАСКАДНЫХ АППАРАТАХ

Специальность: 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Белгород – 2011

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)

Научный руководитель:	доктор технических наук, доцент, Дзюзер Владимир Яковлевич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, доцент Шарапов Рашид Ризаевич
	доктор технических наук, профессор Ермаков Анатолий Александрович
Ведущая организация:	ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет» (г. Екатеринбург)

Защита состоится «27» декабря 2011 г. в $15^{\underline{00}}$ на заседании диссертационного совета Д 212.014.04 при ФГБОУ ВПО Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.

Автореферат разослан «____»_____2011 г.

Ученый секретарь совета В.А.Уваров

Актуальность темы. При переработке сыпучих материалов в строительной индустрии и других отраслях промышленности важное место занимает процесс пневматической классификации. От качества разделения во многом зависят конечные свойства готовых продуктов. Прогрессивным решением задачи фракционирования дисперсных материалов является применение пневматических каскадных классификаторов. Повышение эффективности каскадных аппаратов осуществляется совершенствованием конструкций и оптимальной настройкой технологических режимов оборудования.

Разработка высокоэффективных конструкций каскадных пневмоклассификаторов и эффективная настройка технологических параметров процесса фракционирования является актуальной задачей научного исследования, имеющей важное прикладное значение.

Цель и задачи исследования. Цель работы – разработка методов расчета и конструкций эффективных каскадных пневмоклассификаторов.

Для достижения поставленной цели, решались следующие задачи:

- разработка математического описания процесса пневмоклассификации с учетом влияния расходной концентрации материала по отдельным элементам каскада;
- разработка алгоритма оптимизации границы разделения в условиях непостоянства гранулометрического состава исходного материала;
- экспериментальные исследования влияния расходной концентрации для различных элементов каскада на эффективность и границу разделения;
- разработка конструкций каскадных классификаторов и их промышленная апробация.

Научная новизна:

1. Получены математические выражения, описывающие процесс последовательной каскадной классификации с учетом влияния расходной концентрации дисперсного материала на эффективность и границу разделения;

2. Разработан алгоритм оптимизации границы разделения для получения максимального выхода готового продукта при непостоянстве гранулометриче-

ского состава исходного материала;

3. Экспериментально установлены математические зависимости эффективности и границы разделения от расходной концентрации материала.

Практическая значимость заключается в использовании полученных в работе экспериментальных и математических зависимостей при проектировании и наладке промышленных аппаратов. Разработаны новые конструкции каскадных классификаторов и осуществлено их внедрение в промышленности. В результате внедрения пневмоклассификатора производительностью 25 т/ч на ОАО «Вишневогорский ГОК» получен крупнодисперсный шпат для стекольной промышленности с содержанием пылевых классов размером менее 125 мкм не более 20 %. На ОАО «Русский магний» (г. Асбест) испытания промышленного классификатора производительностью 2,5 т/ч показали возможность получения из отходов асбестового производства фракции серпентинита $0{,}2-0{,}5$ мм, пригодной для извлечения из нее металлического магния.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на VII научной технической конференции «Переработка промышленных отходов в стройматериалы» (Свердловск, 1984); Всероссийской конференции «Пути дальнейшей интенсификации и повышения эффективности производства калийных удобрений» (Пермь, 1985); Всесоюзной конференции «Технология сыпучих материалов» (Ярославль, 1989); научно-технической Всесоюзной конференции «Фундаментальные исследования и новые технологии в строительном материаловедении» (Белгород, 1989); на Всероссийской межвузовской научно-практической конференции «Конверсия вузов – защите окружающей среды» (Свердловск, 1994); XVI Уральской международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям науки и техники (Екатеринбург, 2009), Всероссийской научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, 2010).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 24 работы, из них 12 работ в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; получено 6 авторских

свидетельств СССР на изобретение и одна заявка на патент Великобритании.

Структура и объем. Работа диссертации изложена на 145 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (125 наименований) и трех приложений, содержит 12 таблиц и 65 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Обзор литературы. Рассмотрено современное состояние вопросов в области пневмоклассификации, представленное трудами М.Д. Барского, С.Г. Ушакова, В.Е. Мизонова, В.С. Богданова, В.П. Жукова, В.А. Кирсанова и др. ученых. Показано, что если известна функция степени фракционного разделения, то можно полностью рассчитать результаты процесса сепарации: найти выход крупного и мелкого продуктов, определить их гранулометрический состав; объективно сравнить эффективность аппаратов по виду функции (мере ее приближения к единичной функции «идеального» классификатора).

Анализ литературных данных показывает, что имеются нерешенные задачи в теории каскадной пневмоклассификации:

1. Существующие методы расчета не учитывают распределение концентрации материала по отдельным каскадам классификатора. Так, например, для перечистки крупного продукта функция фракционного извлечения $\Phi_{к(ПКК)}(x_i)$ последовательного каскадного классификатора (ПКК) определяется через функцию $\Phi_{0к}(x_i)$ отдельных каскадов по формуле

$$\Phi_{к(ПКК)}(x_i) = \Phi^n_{0к}(x_i). \qquad (1)$$

В реальных аппаратах концентрация материала в отдельных каскадах может различаться в 10-20 раз. При этом известно, что концентрация влияет на границу и эффективность разделения.

2. На практике не бывает детерминированных гранулометрических составов. Содержание отдельных фракций в исходном материале изменяется в некоторых пределах. Однако при расчетах параметров разделения обычно задают конкретный детерминированный состав.

Глава 2. Расчетно-теоретические исследования процесса каскадной пневмоклассификации. Реальные последовательные каскадные классификаторы, как

показывает практика, имеют разные функции степени фракционного разделения для каждого элемента. Связано это с тем, что элементы каскада работают при различных концентрациях. Например, в ПКК, реализующем перечистку крупного продукта, при равных режимных параметрах концентрация материала убывает от первого элемента к последнему (рис. 1). Для конкретной конструкции аппарата эффективность и величина граничного зерна зависят от концентрации материала. Если иметь для элемента ПКК экспериментальные зависимости эффективности и границы разделения от концентрации, то можно оптимизировать работу всего аппарата.

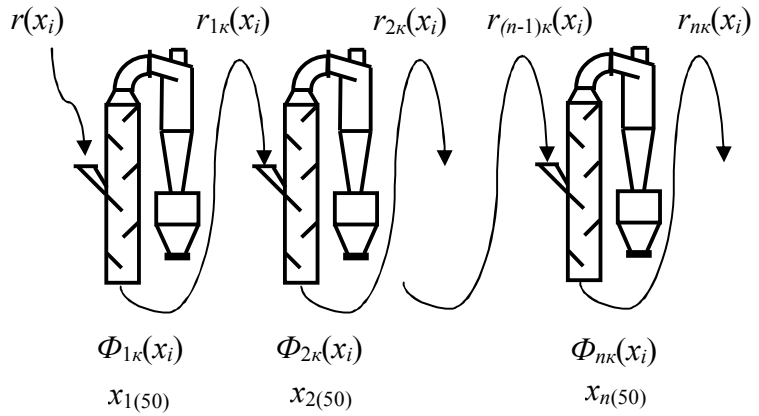


Рис. 1. Последовательный каскадный классификатор из *n* элементов, реализующий перечистку крупного продукта

Гранулометрический состав материала часто определяется ситовым анализом, поэтому его удобно интерпретировать с помощью понятия арифметического вектора. В нашем случае компонента r_i вектора $\overline{\mathbf{r}}\{r_1, r_2, ...r_i, ...r_m\}$ представляет собой частный остаток на *i*-м сите. Поскольку содержание *i*-го класса в *j*-м элементе каскада должно быть равно входу со всех остальных элементов и внешнего входа (если в данный элемент осуществляется подача исходного материала), можно записать систему уравнений

$$\begin{aligned} r_{1i} &= r_i + a_{21}r_{2i} + a_{31}r_{3i} + ... + a_{n1}r_{ni} \\ r_{2i} &= a_{12}r_{1i} + a_{32}r_{3i} + ... + a_{n2}r_{ni} \\ &\cdots \\ r_{ni} &= a_{1n}r_{1i} + a_{n1}r_{2i} + ... + a_{n-1n}r_{n-1i}. \end{aligned} \qquad (2)$$

В этих уравнениях элемент a_{jk} матрицы представляет собой вход в *k*-й

элемент каскада из *j*-го элемента каскада *i*-го класса. Элемент a_{jk} может принимать одно из трех значений:

1) $a_{jk} = 0$, если в *k*-й элемент каскада из *j*-го ничего не приходит;

2) $a_{jk} = \Phi_{jм}(x_i)$, если в *k*-й элемент каскада из *j*-го приходит мелкий продукт разделения;

3) $a_{jk} = 1 - \Phi_{jм}(x_i) = \Phi_{jк}(x_i)$, если в *k*-й элемент каскада из *j*-го приходит крупный продукт разделения;

Для ПКК из *n* элементов каскада с перечисткой крупного продукта (рис. 1) уравнения баланса будут иметь вид

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \Phi_{1к} & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \Phi_{2к} & -1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \Phi_{(n-1)к} & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ \\ r_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{3}$$

Решив матрицу, получим выражение для функции степени фракционного извлечения в крупный продукт для ПКК

$$\Phi_{к(ПКК)}(x_i) = \prod_{j=1}^{n} \left(\Phi_{jк}(x_i)\right). \tag{4}$$

Используя экспериментальные данные, функция фракционного разделения для отдельного каскада $\Phi_{jк}(x_i)$ может быть аппроксимирована двухпараметрической зависимостью $\Phi_{jк}[x_i, x_{50}(\mu), p(\mu)]$. При этом в качестве параметров выступают граница разделения $x_{50}(\mu)$ и параметр эффективности $p(\mu)$, зависящие от концентрации μ. Таким образом, мы получаем функцию фракционного извлечения для последовательного каскада $\Phi_{к(ПКК)}\{\Phi_{jк}[x_i, x_{50}(\mu), p(\mu)]\}$, где $x_{50}(\mu)$ и $p(\mu)$ экспериментальные функции для классификатора, выбранного в качестве элемента последовательного каскада. Концентрацию материала в *n*-ом элементе каскада можно определить как

$$\mu_n = \frac{G_и}{V_п} \frac{\gamma_{к1}}{100} \frac{\gamma_{к2}}{100} \dots \frac{\gamma_{к(n-1)}}{100} = \frac{G_и}{V_п} \prod_{j=1}^{n-1} \frac{\gamma_{кj}}{100^j} \tag{5}$$

Знание функции фракционного разделения ПКК позволяет не только рас-

считать продукты разделения, но и выбрать наилучшую структуру взаимосвязи отдельных элементов, а также оптимальные настройки границ разделения для отдельных элементов, обеспечивающие максимальную эффективность всего классификатора.

Задача расчета продуктов сепарации $r_{\text{к}}(x_i), r_{\text{м}}(x_i)$ и выбора оптимальной границы разделения x_{50} в случае колебаний гранулометрического состава исходного материала решена на примере задачи получения формовочных кварцевых песков. Чтобы получить кварцевый песок, например, марки ОбК0315 необходимо убрать до 0,5 % загрязняющие классы и обеспечить содержание трех целевых фракций не менее 80 %. Необходимо получить максимальное количество готового продукта, удовлетворяющего данным требованиям.

Если классификатор настроен на определенную фиксированную границу разделения, то содержание полезных и пылевых фракций в продукте разделения будет зависеть от гранулометрического состава исходного материала. В частности содержание произвольного *i*-го класса в крупном (готовом) продукте разделения определяется формулой

$$r_{к}(x_i) = \frac{100}{\gamma_{к}} \Phi_{к(ПКК)}(x_i, x_{50}, p) \cdot r(x_i). \qquad (6)$$

Содержание основных (полезных) R_o и пылевых R_p классов в готовом продукте можно рассчитать формулам:

$$R_o = \sum_{i=k}^{m} r_{к}(x_i); \qquad (7)$$

$$R_p = \sum_{i=l}^{e} r_{к}(x_i). \qquad (8)$$

Дисперсный состав исходного материала $r(x_i)$ является случайной величиной, и изменяется в некоторых пределах:

$$r^{н}(x_i) \le r(x_i) \le r^{в}(x_i) \qquad (9)$$

В качестве целевой функции выбирается выход готового (в нашем случае крупного) продукта разделения

$$\gamma_к = \frac{1}{100}\sum_{i=1}^{n} \Phi_к(x_i, x_{50}, p) r(x_i) \Rightarrow \max. \qquad (10)$$

Необходимо получить максимальный выход $\gamma_к$, управляя границей разделения x_{50}. При этом необходимо, чтобы вероятность отсутствия брака была максимальной, т.е. чтобы содержание основных фракций составляло:

$$\begin{cases} R_o = \sum_{i=k}^{m} r_к(x_i) = \frac{100}{\gamma_к}\sum_{i=к}^{l} r(x_i)\Phi_к(x_i) \geq A \\ R_p = \sum_{i=l}^{e} r_к(x_i) = \frac{100}{\gamma_к}\sum_{i=1}^{e} r(x_i)\Phi_к(x_i) \leq B. \end{cases} \qquad (11)$$

Поскольку целевая функция нелинейная, то задача представляет собой задачу нелинейного программирования. Кроме того, поскольку в систему ограничений неявно входит целевая функция, то задача относиться к классу вырожденных. Известно, что даже в случае детерминированного состава надежных алгоритмов решения данной задачи не существует. В случае недетерминированного состава решение носит вероятностный характер. Поскольку размерность задачи небольшая и из физического смысла известен диапазон границ разделения, то она решалась методом имитационного моделирования. Имитируются колебания гранулометрического состава исходного материала в заданных пределах. Генерируется, например, 100 случайных исходных составов в соответствие с неравенством (9) и затем, для конкретной границы разделения вычисляются составы продуктов разделения и выход готового материала. Определяется вероятность решения задачи по числу удачных генераций. Для каждой границы разделения вычисляется математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение расчетных величин. Таким образом, получаем зависимость от границы разделения вероятности решения задачи $P(x_{50})$, выхода готового продукта $\gamma_к(x_{50})$, содержания полезных $R_o(x_{50})$ и пылевых классов $R_p(x_{50})$. Из полученного массива данных выбирается граница разделения x_{50}, которой соответствует максимальный выход готового продукта и необходимый уровень вероятности решения задачи.

На рис. 2 показана зависимость вероятности решения задачи, а на рис. 3 зависимости выхода и содержания целевых фракций в готовом продукте от

границы разделения при получении фракции ОбК0315 формовочного песка ($A = 80$ %, $B = 0{,}5$ %). Для данного примера была задана эффективность разделения $k_{75/25} = 70$ %.

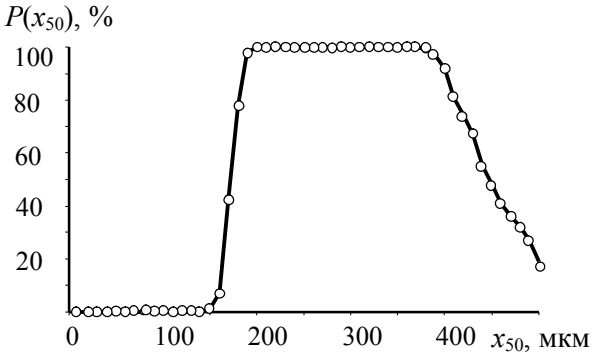


Рис.2. Зависимость вероятности решения задачи от границы разделения

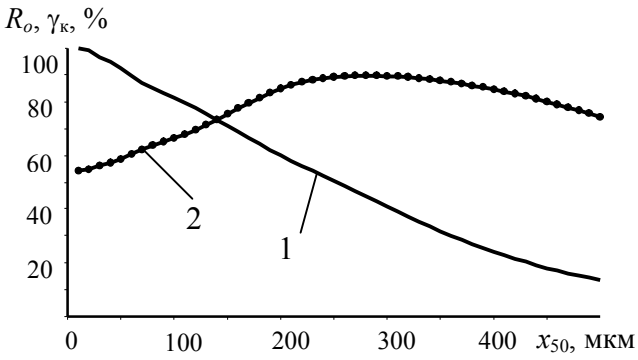


Рис. 3. Зависимость выхода готового продукта и содержания основных фракций от границы разделения: 1 – $\gamma_к$, 2 – R_o

Как следует из представленных графиков, при уровне вероятности решения задачи $P(x_{50}) = 98$ % максимальный выход готового (крупного) продукта разделения составляет $\gamma_к(x_{50}) = 62{,}1$ %. При этом граница разделения должна быть $x_{50} = 190$ мкм.

Глава 3. Экспериментальные исследования каскадных пневмоклассификаторов. Определение влияния эффективности и границы разделения от расходной концентрации проводилось на различных конструкциях каскадных классификаторов. Опыты проводились в широком диапазоне изменения скоростей воздушного потока через аппарат (от 0,1 до 4 м/с) и расходных концентраций (от 0,2 до 15 кг/м^3).

Так как на границу разделения влияют, кроме конкретной конструкции аппарата, также скорость газового потока, плотность частиц и плотность газа, то для расчетов использовался обобщенный параметр $B = \dfrac{(\rho_ч - \rho)}{\rho} \dfrac{g x_{50}}{w^2}$. На рис. 4 в качестве примера показана зависимость $B = f(\mu)$ для классификатора с треугольными полками. Зависимости эффективности разделения от расходной концентрации описываются S-образными кривыми. На рис. 5 приведен график $k_{75/25} = f(\mu)$ для многорядного классификатора. В общем виде зависимости эф-

фективности и границы разделения получены в виде уравнений

$$k_{75/25} = a + \frac{b}{1 + \left(\frac{\mu}{c}\right)^d}, \tag{12}$$

$$x_{50} = \frac{e\mu^f w^2 \rho}{g(\rho_ч - \rho)}, \tag{13}$$

где коэффициенты *a, b, c, d, e, f* являются параметрами идентификации и зависят только от конструкции аппарата.

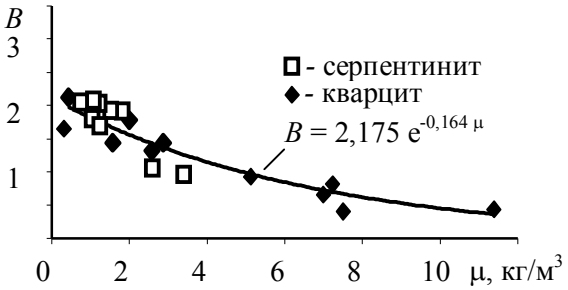


Рис. 4. Зависимость обобщенного параметра от расходной концентрации на классификаторе с треугольными полками

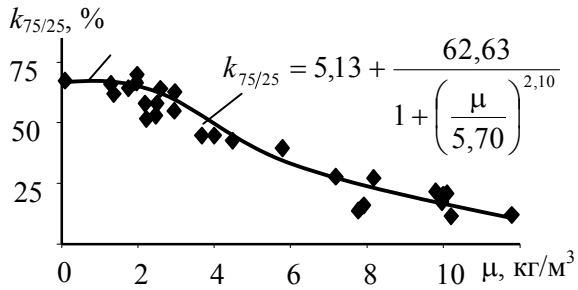


Рис. 5. Зависимость эффективности разделения от расходной концентрации на многорядном классификаторе

С учетом формул (12), (13) аппроксимация функции степени фракционного извлечения в крупный продукт для отдельного аппарата $\Phi_{jк}$ по двухпараметрической формуле Плитта преобразуется к виду

$$\Phi_{jк}(x_i) = \frac{\left(\frac{x_i}{x_{j50}(\mu_j, w)}\right)^{p_j(\mu_j)}}{1 + \left(\frac{x_i}{x_{j50}(\mu_j, w)}\right)^{p_j(\mu_j)}} = \frac{\left(\frac{x_i g(\rho_ч - \rho)}{e\mu^f w^2 \rho}\right)^{\left(\ln(1/9) \Big/ \ln\left(a + \frac{b}{1+\left(\mu/c\right)^d}\right)\right)}}{1 + \left(\frac{x_i g(\rho_ч - \rho)}{e\mu^f w^2 \rho}\right)^{\left(\ln(1/9) \Big/ \ln\left(a + \frac{b}{1+\left(\mu/c\right)^d}\right)\right)}} \tag{14}$$

Оценка адекватности полученных математических выражений (4), (5), (14) для последовательного каскада и сравнение ее результатов с традиционной зависимостью (1), не учитывающей расходную концентрацию на промышленном многорядном классификаторе с треугольными полками по разделению серпентинита, показала удовлетворительные результаты (рис. 3, табл. 1). Ошибка вычисления гранулометрического состава по математическим зависи-

мостям для последовательного каскада не превышает 10 %, погрешность расчета гранулометрического состава без учета концентрации составляет более 45 %.

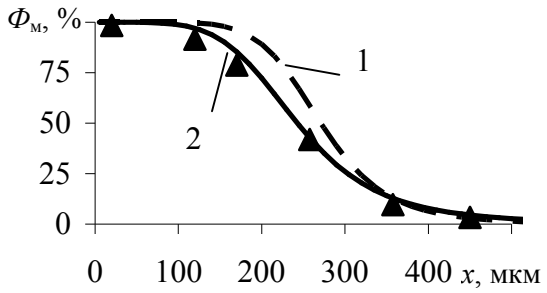


Рис. 6. Аппроксимация функции степени фракционного извлечения в мелкий продукт:
1 – расчет без учета концентрации; 2 – расчет с учетом концентрации;
▲промышленные испытания

Таблица 1

Сравнительные результаты расчета процесса сепарации серпентинита

Размер сит, мкм	Промышленный эксперимент	Расчет с учетом концентрации		Расчет без учета концентрации	
	$r_к(x_i)$, %	$r_к(x_i)$, %	Δ, %	$r_к(x_i)$, %	Δ, %
1000	0,00	0	0,00	0,00	0,00
630	0,10	0,10	0,00	0,17	70,00
500	0,70	0,74	5,71	1,26	80,00
400	22,60	23,13	2,35	38,95	72,35
315	28,00	28,01	0,04	41,40	47,86
200	39,30	42,86	9,06	18,23	53,61
Средняя ошибка, %			3,43		64,76
Выход продукта	$\gamma_к$, %	$\gamma_к$, %	Δ, %	$\gamma_к$, %	Δ, %
	53,15	50,10	5,74	41,73	21,49

Глава 4. Разработка новых конструкций каскадных классификаторов и их промышленная апробация. В этой главе даны результаты исследований новых конструкций каскадных классификаторов, защищенных 6 свидетельствами на изобретения и заявкой на патент Великобритании.

Промышленная апробация разработанных аппаратов проведена на двух предприятиях.

На ОАО «Вишневогорский горно-обогатительный комбинат» промышленные испытания комбинированного многоколонного классификатора (рис.7) показали возможность получить крупнодисперсный шпат для стекольного производства с содержанием фракции менее 125 мкм не более 20 % и выходом более 80 %. Мелкодисперсный шпат при этом направляется для производства ке-

рамической плитки. Производительность аппарата по исходному сырью – 25 т/ч, исходное содержание пылевой фракции 40–50 %.

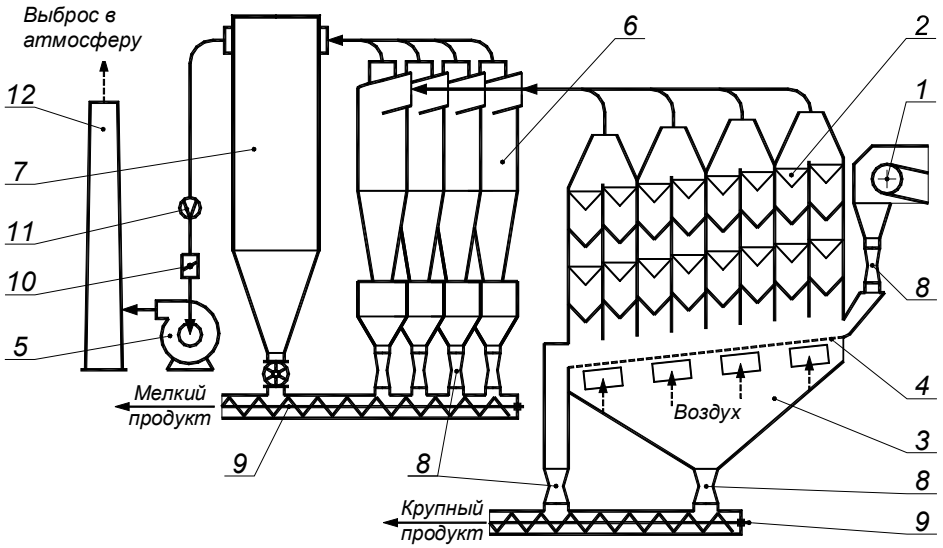


Рис. 7. Схема промышленной установки последовательного каскадного классификатора:
1 – питатель; 2 –классификатор; 3 – кожух; 4 – газораспределительная решетка;
5 – вентилятор; 6 – циклоны; 7 – рукавный фильтр; 8 – рукавные разгрузители;
9 – винтовые транспортеры; 10 – шибер; 11 – расходомер; 12 – труба выброса

Для ОАО «Русский магний» разработан и внедрен гравитационный каскадный классификатор производительностью по исходному сырью до 2,5 т/ч для переработки отходов асбестового производства. Технологической схемой предусматривается выделение фракции серпентинита $0{,}2-0{,}5$ мм с полным удалением свободных волокон асбеста. В дальнейшем из этого сырья выщелачиванием получают металлический магний и другие редкоземельные элементы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ литературных данных показывает, что известные методы расчета каскадных классификаторов не учитывают изменение расходной концентрации материала по отдельным элементам каскада, а также при расчете параметров процесса разделения, как правило, не учитывается случайный характер гранулометрического состава исходного материала. Отмеченные недостатки ограничивают возможности повышения эффективности разделения в этих аппаратах.

2. Получены математические выражения для расчета параметров процесса разделения сыпучих материалов в последовательном каскадном классифика-

торе, их особенностью является учет влияния расходной концентрации в отдельных элементах каскада на эффективность и границу разделения.

3. Для адаптации полученных математических выражений использованы установленные экспериментальные зависимости эффективности и границы разделения от расходной концентрации для различных конструкций каскадных пневмоклассификаторов. Полученные уравнения удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Показано, что средняя погрешность расчета гранулометрического состава готового продукта, полученного на промышленной установке ОАО «Русский магний», не превышает 10 %.

4. Разработан алгоритм оптимизации границы разделения при изменениях гранулометрического состава исходного материала. Его применение позволяет рассчитать границу разделения, при которой в условиях недетерминированного исходного состава обеспечивается максимальный выход готового продукта с учетом ограничений на содержание в нем основных и загрязняющих фракций.

5. Созданы новые конструкции элементов каскадных классификаторов, применение которых обеспечивает повышение эффективности разделения за счет рационального использования сепарационного пространства каждой секции аппарата, возможность регулирования направления и скорости движения пылевоздушного потока в подполочных вихрях, выравнивания эпюры двухфазного потока в верхних секциях классификатора, а также закрутки потока за счет специальной конструкции конусообразных элементов.

6. Для разделения тонкодисперсных порошков предложена конструкция пневматического многоколонного классификатора с диспергирующим и сепарирующим участками, а также каскадный аппарат с перфорированным желобом и отклоняющими пластинами и жалюзийный пневмоклассификатор с собирающей решеткой. Эффективность разделения сыпучих материалов на аппаратах составляет 78–82 % по критерию Эдера-Майера. На конструкции классификаторов получены 6 свидетельств на изобретения и одна заявка на патент Великобритании.

7. Результаты работы использованы при проектировании промышленных установок по пневмоклассификации сыпучих материалов на ОАО «Вишневогорский горно-обогатительный комбинат» производительностью 25 т/ч и на магниевом заводе ОАО «Русский магний» (г. Асбест) 2,5 т/ч.

Внедрение каскадного пневмоклассификатора на ОАО «Вишневогорский ГОК» позволило получить крупнодисперсный шпат для стекольной промышленности с содержанием пылевых классов размером менее 125 мкм не более 20 %. На ОАО «Русский магний» (г. Асбест) получена фракция серпентинита $0{,}2-0{,}5$ мм, пригодная для извлечения из нее металлического магния. Ожидаемый экономический эффект за счет увеличения выхода готового продукта с 37,5 % до 53 % составляет 1740000 руб. в ценах 2011 г.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

а) в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. *Барский М.Д.* Пневматическая классификация периклазовых порошков / М.Д. Барский, В.Б. Пономарев, А.И. Петров [и др.] // Огнеупоры. – 1990. – № 9. – С. 17 - 18.

2. *Зимин А.И.* Расчет разделительных многорядных аппаратов с учетом распределения в потоке / А.И. Зимин, А.В. Говоров, Ю.П. Канусик, В.Б. Пономарев // Изв. Вузов: Горный журнал. – 1996. – № 2. – С. 122 - 124.

3. *Зимин А.И.* Расчет процесса пневмоклассификации в аппаратах различных конструкций / А.И. Зимин, А.В. Говоров, Ю.П. Канусик, В.Б. Пономарев // Изв. Вузов: Горный журнал. – 1995. – № 9. – С. 118 - 121.

4. *Зимин А.И.* Оценка режимов и результатов пневмоклассификации / А.И. Зимин, А.В. Говоров, Ю.П. Канусик, В.Б. Пономарев // Изв. Вузов: Горный журнал. – 1996. – № 12. – С. 108 - 111.

5. *Пономарев В.Б.* Предварительная пылегазоочистка в центробежно-гравитационном пневматическом классификаторе / В.Б. Пономарев, В.Л. Данилов, А.В. Катаев // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2010, – № 2. – С. 172 – 174.

6. *Пономарев В.Б.* Аналитическое прогнозирование процесса воздушной классификации серпентинита для ОАО «Русский магний» / В.Б. Пономарев, В.Я. Дзюзер, В.Л. Данилов, А.А Литвинов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2010. – № 9. – С. 12 - 15.

7. *Пономарев В.Б.* Установка пневматической классификации шпата / В.Б. Пономарев, С.Ф. Шишкин, В.Я. Дзюзер, А.В. Катаев // Огнеупоры и техническая керамика. – 2010. – № 10. – С. 28 – 31.

8. *Пономарев В.Б.* Влияние расходной концентрации на параметры функции фракционного разделения / В.Б. Пономарев, С.Ф. Шишкин, В.Я. Дзюзер // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2010, – № 3. – С. 200-203.

9. *Пономарев В.Б.* Обогащение сыпучих материалов с применением процесса воздушной классификации / В.Б. Пономарев // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2010, – № 4. – С. 35-39.

10. *Дзюзер В.Я.* Выбор оптимальной границы разделения при колебаниях гранулометрического состава исходного материала / В.Я. Дзюзер, В.Б. Пономарев, С.Ф. Шишкин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2010, – № 4. – С. 12-15.

11. *Пономарев В.Б.* Влияние расходной концентрации на технологический процесс пневмоклассификации минерального сырья / В.Б. Пономарев, В.Я. Дзюзер, // Огнеупоры и техническая керамика. – 2010. – № 11-12. – С. 18-21

12. *Пономарев В.Б.* Выделение посторонних примесей из аморфного диоксида кремния / В.Б. Пономарев, В.Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. – 2010. – № 11-12. – С. 44 – 48.

б) в других изданиях

13. *Пономарев В.Б.* Переработка отсевов камнедробления методом пневматической классификации / В.Б. Пономарев, А.В. Катаев // Фундаментальные исследования и новые технологии в строительном материаловедении: материалы Всесоюзной науч. - техн. конф. – Белгород, 1989. – С. 18 - 19.

14. *Пономарева А.В.* Математическая модель для анализа серпентинита после грохочения 0,55 мм на обогатимость при разделении в пневматических классификаторах / А.В. Пономарева, В.Л. Данилов, В.Б. Пономарев // науч. труды XVI Уральской Междун. конф. молодых ученых по приор. напр. науки и техники: сб. статей. В 4 ч. Ч. 4. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – С. 64 - 69.

15. *Большедворов В.А.* Промышленные испытания пневмоклассификатора / В.А. Большедворов, В.Б. Пономарев, В.Л. Данилов // науч. труды XVI Уральской междун. конф. молодых ученых по приор. напр. науки и техники: сб. статей. В 4 ч. Ч. 4. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2009. – С. 31 – 33.

16. *Пономарев В.Б.* Влияние расходной концентрации на параметры процесса фракционирования порошков в каскадном аппарате с треугольными полками / В.Б. Пономарев, А.В. Пономарева // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиц. и возобн. источники энергии: сб. матер. Всеросс. науч.-практ. конф. студ., аспир. и молодых ученых 22-26 ноября 2010 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – С. 173 – 175.

17. *Камусин А.А.* Промышленные испытания классификатора для пневмоклассификации шпата /А.А. Камусин, В.Б. Пономарев // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиц. и возобн. источники энергии: сб. матер. Всеросс. науч.-практ. конф. студ., аспир. и молодых ученых 22-26 ноября 2010 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2010 – С. 260 – 261.

18. А.с. 1743649 СССР, МКИ^4 В 07В 4/08. Пневмоклассификатор / М.Д. Барский, В.Б. Пономарев. № 4844187/03; заявл. 29.05.1990; опубл. 30.06.1992. Бюл. № 24.

19. А.с. 1613127 СССР, МКИ^4 В 03В 4/00. Каскадный пневматический классификатор / М.Д. Барский, А.В. Катаев, В.Б. Пономарев [и др.]. № 4664358/29 – 03; заявл. 13.01.1989; опубл. 15.12.1990. Бюл. № 46.

20. А.с. 1731294 СССР, МКИ^4 В 07В 4/02. Каскадный классификатор /

М.Д. Барский, В.Б. Пономарев, А.В. Катаев, Р.Г. Рева, Г.А. Калугару. № 4829951/03; заявл. 17.04.1990; опубл. 07.05.1992. Бюл. № 17.

21. А.с. 1722617 СССР, МКИ[4] В 07В 4/04. Способ разделения / М.Д. Барский, А.В. Говоров, Ю.П. Канусик, В.Б. Пономарев. № 4820393/03; заявл. 21.03.1990; опубл. 30.03.1992. Бюл. № 12.

22. А.с. 1337151 СССР, МКИ[4] В 07В 4/02. Гравитационный пневматический классификатор / М.Д. Барский, В.Л. Данилов, С.Ф. Шишкин, А.В. Катаев, А.В. Коновалов, А.И. Петров, В.Б. Пономарев. № 4019043/29 – 03; заявл. 28.01.1986; опубл. 15.09.1987. Бюл. № 34.

23. А.с. 1265002 СССР, МКИ[4] В 07В 4/08. Пневматический многоколонный классификатор / М.Д. Барский, В.И. Малагамба, В.Б. Пономарев, А.П. Ремезов. № 3696781/29 – 03; заявл. 03.02.1984; опубл. 23.10.1986. Бюл. № 39.

24. UK Patent Application GB 2193449 A. INT CL B 07B 4/08 – 4/04. Air gravity classifier for loose materials / M.D. Barsky, A.I. Petrov, A.V. Kataev, V.B. Ponomarev. (USSR) // London, 10.02.1988.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

ПКК – последовательный каскадный классификатор, $\Phi_м(x_i)$, $\Phi_к(x_i)$ – степень фракционного извлечения в мелкий (крупный) продукт, %; $\Phi_{jк}(x_i)$ – степень фракционного извлечения в крупный продукт для единичного каскада классификатора, %; $\Phi_{к(ПКК)}(x_i)$ – степень фракционного извлечения в крупный продукт для ПКК, %; x_i – средний размер частиц *i*-го узкого класса крупности, м; r_i, $r(x_i)$ – частный остаток исходного материала на *i*-ом сите, %; $r_{кi}(x_i), r_{мi}(x_i)$ – частные остатки крупного (мелкого) продукта, %; $\gamma_к$, $\gamma_м$ – массовый выход крупного (мелкого) продукта, %; μ – средняя расходная концентрация дисперсной фазы, кг/м^3; $\mu_{авт}$ – концентрация в зоне автомодельности, кг/м^3; R_o, R_p – содержание основных (полезных) и пылевых классов, %; *k, m* – номера основных классов; *l, e* – номера пылевых классов; x_{50} – граница разделения, м; *p* – параметр эффективности в формуле Плитта; $k_{75/25}$ – эффективность разделения по показателю Эдера-Майера, %; $P(x_{50})$ – вероятность решения задачи от границы разделения, %; g – ускорение свободного падения, м/с^2; w – средняя скорость движения воздуха в аппарате, м/с; $\rho_ч$, ρ – плотность твердых частиц и плотность среды, кг/м^3; $G_и$ – производительность по исходному питанию, кг/с; V – объемный расход воздуха, м^3/с.

Подписано в печать 21.11.2011 Формат 60х84 1/16
Усл.печ.л 1,0 Тираж 100 экз. Заказ

Ризография НИЧ УрФУ
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19