

УДК 621.926; 621.928

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ПИГМЕНТОВ
НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ**

**IMPROVEMENT OF FINE PIGMENTS PRODUCTION TECHNOLOGY
BY MEANS OF MATHEMATICAL MODELING OF GRINDING PROCESS**

А.Н. БЕЛЯКОВ
A.N. BELYAKOV

(Ивановский государственный энергетический университет)
(Ivanovo State Power University)
E-mail: ab_pm@mail.ru

На основе уравнения Больцмана предложено математическое описание совмещенных механических процессов в технологических системах измельчения пигментов. Сформулирована задача оптимального управления профилем канала рабочей зоны в струйной мельнице с целью совершенствования процесса получения пигментов. Получены результаты численного решения оптимизационной задачи.

A mathematical description of combined mechanical processes in milling circuit for fine pigments production based on the Boltzmann equation is proposed. The problem of jet mill grinding chamber optimal profile to improve pigments production is formulated. The results of the numerical solution of the optimization problem are obtained.

Ключевые слова: пигмент, гранулометрический состав, совмещенные процессы, измельчение, классификация, технологическая система измельчения, струйная мельница кипящего слоя.

Keywords: pigment, particle size distribution, combined processes, grinding, classification, milling circuits, fluidized bed jet mill.

Качество окрашивания тканей наряду с технологией обработки и типом красителей во многом определяется дисперсным составом пигментов [1]. Наиболее предпочтительными являются однородные порошки, содержащие частицы одинакового размера. Совершенствование технологии получения дисперсных порошков для повышения качества готовой продукции является актуальной темой исследования.

Целью предлагаемого исследования является совершенствование технологии получения порошков (пигментов) на основе моделирования, расчета и оптимизации технологических процессов их получения.

Для достижения поставленной цели последовательно решаются следующие задачи:

- декомпозиция технологической системы измельчения (ТСИ) на отдельные подсистемы;
- выбор определяющих координат, описывающих совмещенные процессы для каждой подсистемы;
- построение общего расчетного пространства системы из расчетных подпространств отдельных ее подсистем с указанием связей между ячейками расчетной области, согласование входных и выходных информационных потоков для этих ячеек, построение модели системы;
- постановка и решение задачи оптимального управления совмещенными процессами с целью повышения качества готового порошка.

Предметом исследования являются совмещенные механические процессы в технологических системах измельчения пигментов, объектом исследования –

струйная мельница кипящего слоя [2...4], в которой эти процессы реализуются.

Выбор струйных мельниц кипящего слоя [2...4] в качестве объекта исследования объясняется, с одной стороны, их широким использованием во многих отраслях промышленности и, с другой стороны, возможностью совмещения в данном аппарате нескольких технологических операций: измельчение, классификация и пневмотранспорт гетерогенных сред.

На рис. 1 представлены эскиз исследуемой конструкции струйной мельницы кипящего слоя [2], [3] (а) и расчетная схема потоков (б) в струйной мельнице кипящего слоя: 1 – размольная камера; 2 – гравитационная ступень классификации; 3 – центробежная ступень классификации; В – подача воздуха; П – подача исходного порошка; М – выход мелкого продукта разделения. Исходный материал и воздух подаются в размольную камеру 1.

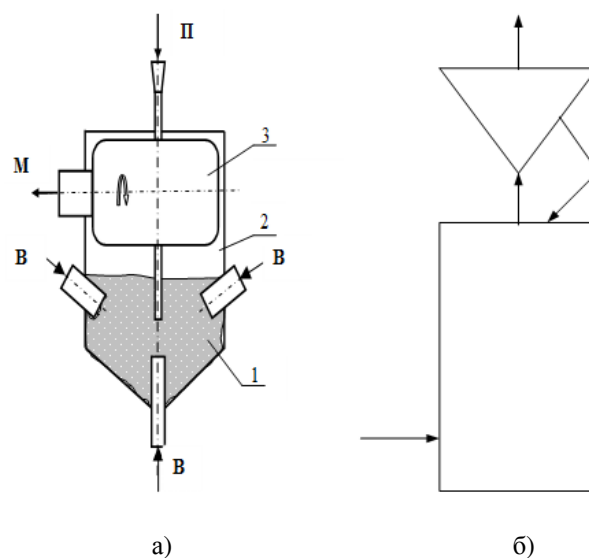


Рис. 1

Режимы подачи воздуха и материала обеспечивают пребывание частиц в камере в псевдооживленном состоянии. Измельчение материала происходит преимущественно за счет истирания частиц при их столкновении между собой и со стенками аппарата. Измельченные частицы разной крупности выносятся потоком воздуха в гравитационную ступень классификатора 2, где происходит их разделение по размеру. Крупные зерна после классификации возвращаются в размольную камеру, а мелкие частицы выносятся воздухом в следующую, центробежную ступень классификатора 3. Мелкие частицы после центробежной ступени покидают аппарат, а крупные зерна возвращаются на повторное измельчение в размольную камеру.

В струйных мельницах одновременно и совместно протекают процессы измельчения, классификации и пневмотранспорта порошкообразных материалов. Под совмещенными процессами [5], [6] понимаются такие, когда два или более процессов протекают одновременно и в одном аппарате с эффективностью на уровне или выше, чем раздельно. Для эффективной организации совмещенных процессов необходимо учитывать влияние кинетики протекания одного процесса на кинетику других процессов, что обуславливает необходимость их совместного моделирования, расчета и оптимизации.

Одним из фундаментальных уравнений статистической физики, которое может послужить основой для единого подхода к описанию совмещенных процессов, является кинетическое уравнение Больцмана – основное уравнение в кинетической теории газов [7], [8]. Это уравнение описывает изменение во времени функции распределения молекул газа по скоростям и координатам.

Для моделирования на основе уравнения Больцмана совмещенных механических процессов измельчения и классификации вводится дополнительная координата размера частиц. В этом случае в качестве искомой функции $f(r, v, \delta, t)$ рассматривается плотность распределения вещества по координатам $r(x_1, x_2, x_3)$, скоро-

стям $v(v_1, v_2, v_3)$ и размерам частиц δ . В общем случае изменение функции распределения в фазовом объеме dV обусловлено, во-первых, физическим перемещением частиц ($\text{div}_r(vf)$), во-вторых, изменением скорости частиц ($\text{div}_v(af)$) и, в-третьих, переходом частиц в другой класс крупности за счет их разрушения. Вид правой части уравнения Больцмана [7], [8] с учетом эволюции размера частиц за счет измельчения может быть записан на основе популяционно-балансовой модели измельчения в виде [9]:

$$f'_t + (v_k f)'_{x_k} + (a_k f)'_{v_k} = -fS + \int_{\delta}^{\delta_{\max}} fSb d\epsilon, \quad (1)$$

где $a(a_1, a_2, a_3)$ – ускорение; S, b – селективная и распределительная функции разрушения [9]; δ, ϵ – наблюдаемый и текущий размеры частиц; повторение индекса "k" в слагаемых левой части показывает суммирование по этому индексу. Наиболее перспективным подходом для описания совмещенных технологических процессов является использование дискретных аналогов уравнения Больцмана [9]. При этом одна или несколько координат расчетного пространства совмещенного процесса представляются набором дискретных интервалов. При дискретном представлении крупности частиц уравнение (1) записывается отдельно для каждого выделенного интервала крупности, то есть модель представляется системой указанных уравнений.

Для численного решения уравнения Больцмана используется ячеечный подход [11], построенный на предварительной декомпозиции рабочей области на конечное число подсистем. В результате декомпозиции системы струйной мельницы выделены три подсистемы: размольная камера и две ступени классификации. Структура связей между подсистемами представлена на рис. 1-б. При описании совмещенных процессов для каждой подсистемы выбираются определяющие координаты. В размольной камере и гравитационной ступени классификации одновременно протекают

процессы измельчения, пневмотранспорта и классификации частиц по крупности. В качестве определяющих координат для описания процессов в размольной камере и гравитационной ступени классификации выбраны размер частиц δ , скорость частиц v и координата x , определяющая положение частиц в слое. Оси координат с указа-

нием их направления и вид трехмерного фазового расчетного пространства представлены на рис. 2-а. Рис. 2 – структура расчетного пространства (а) и варианты профилирования рабочего объема в струйной мельнице кипящего слоя (б)-(г): цифровые обозначения аналогичны обозначениям на рис. 1.

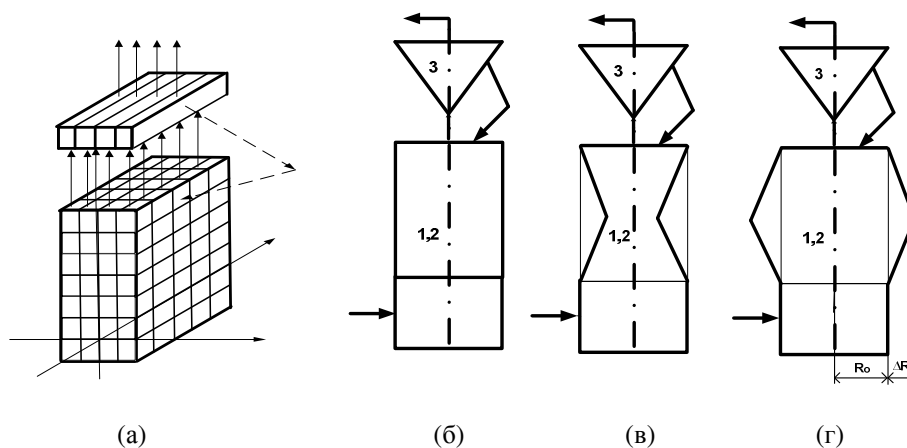


Рис. 2

В центробежной ступени классификации процесс протекает достаточно быстро, поэтому измельчение материала в ней практически отсутствует. Описание процесса классификации в центробежной ступени выполняется с использованием традиционной модели классификатора в виде кривой парциальных выносов [12].

Согласно разработанному методу моделирования и расчета совмещенных процессов в рамках дискретных аналогов уравнения Больцмана [9], [11] для получения замкнутого описания необходимо определить вероятности перехода вещества между ячейками выбранного расчетного пространства. Порядок определения этих вероятностей для размольной камеры, гравитационной ступени и центробежной ступени классификации рассматривается в работе [9] и в статье подробно не описывается. Представленная модель совмещенных процессов в струйной мельнице позволяет перейти собственно к формулировке и решению задачи оптимального профилирования канала струйной мельницы.

Задача оптимального профилирования рабочего канала струйной мельницы отно-

сится к классу вариационных задач [10]. В качестве критерия оптимизации (функционала) выбирается минимальное значение дисперсии или среднеквадратичного отклонения размеров зерен от среднего размера зерен в готовом продукте (σ), что соответствует получению более однородного порошка и соответственно наилучшего качества готового продукта. Профиль канала рабочей камеры, вид которого задается на классе известных функций, рассматривается в качестве оптимального управления совмещенными процессами. Варианты исследуемых профилей канала представлены на рис. 2-б, в, г.

Изменение профиля канала приводит к соответствующему изменению локальной скорости газового потока в канале. Изменение скорости газового потока оказывает на совмещенный процесс измельчения и классификации неоднозначное влияние: с одной стороны, увеличение локальной скорости газа увеличивает скорость частиц и соответственно увеличивает интенсивность измельчения при столкновении частиц, а, с другой стороны, возрастает интенсивность выноса из рабочей зоны круп-

ных частиц. Вынос частиц из рабочей зоны и их измельчение можно согласовать при условии совместного моделирования процессов измельчения, и классификации, и нахождения на основе этого моделирования оптимальных условий совместного протекания процессов.

Для установления связи между критерием оптимизации (однородностью готового порошка) и оптимизируемым профилем канала предложены соответствующие расчетные зависимости. Одним из входных параметров модели совмещенных процессов в струйной мельнице [9] является локальная скорость газа в профилируемом канале $w(\bar{x})$. Для определения зависимости этой скорости от высоты зоны при различных вариантах профилирования рабочей камеры (рис. 2) рассмотрен класс линейных зависимостей для ограждения профилируемого канала:

$$r(\bar{x}) = \begin{cases} R_0 + \overline{\Delta R} / 0,5\bar{x}, & \bar{x} \leq 0,5, \\ R_0 + \overline{\Delta R} - \overline{\Delta R} / 0,5(\bar{x} - 0,5), & \bar{x} > 0,5, \end{cases} \quad (2)$$

где $r(\bar{x})$ – изменение радиуса цилиндрической рабочей камеры по ее высоте; $R_0, \Delta R$ – базовый радиус цилиндрической размольной камеры и максимальное изме-

нение этого радиуса при профилировании канала (рис. 2-г); $\bar{x} = x/h$; $\overline{\Delta R} = \Delta R/R_0$ – относительные размеры; h – высота камеры. Скорость газа по высоте профилируемого канала определяется с учетом сохранения расхода газа вдоль этого канала согласно выражению:

$$w(\bar{x}) = w_0 \left(\frac{R_0}{r(\bar{x})} \right)^2. \quad (3)$$

Представленная в работе [9] модель совмещенных процессов в струйной мельнице кипящего слоя с учетом (2), (3) позволяет для каждого профиля канала выполнить расчет ТСИ, определить гранулометрический состав готового порошка и найти значение критерия оптимизации. Вид профиля канала согласно (2) однозначно определяется параметром $\overline{\Delta R}$. Решение задачи оптимального профилирования выполнено методом Ритца [10], то есть вид оптимального профиля найден в ходе решения одномерной оптимизационной задачи относительно параметра оптимизации $\overline{\Delta R}$. Результаты численного решения задачи оптимального профилирования приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Максимальное относительное изменение размера профилируемого канала $\Delta R/R_0$	Средний размер частиц $\langle \delta \rangle / \langle \delta_0 \rangle$	Среднее квадратичное отклонение σ , мкм
-0,25	0,998	2,5
-0,1	0,998	3,4
-0	1	4,1
0,1	1	4,8
0,25	1,006	6,7

Анализ полученных результатов показал, что варьирование профиля канала в рассмотренном диапазоне практически не привело к изменению среднего размера частиц готового порошка, при этом среднее квадратичное отклонение возрастает монотонно (практически в 3 раза) по мере увеличения параметра $\Delta R/R_0$, при относительном сужении канала $(\Delta R/R_0)^* = -0,25$ найден краевой экстремум критерия оптимизации.

В Ы В О Д Ы

Таким образом, предложенный подход путем декомпозиции технологической системы измельчения и построения ее модели в рамках методологии моделирования на основе дискретных аналогов уравнения Больцмана позволил сформулировать и решить на классе известных функций задачу оптимального профилирования канала струйной мельницы, обеспечивающего получение более однородного порошка.

1. Ермилов П.И. Диспергирование пигментов. – М.: Химия, 1971.
2. Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 2011.
3. Айнштейн В.Г. и др. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии.– М.: Высшая школа, 2002.
4. Вулис Л.А. Теория и расчет магнитогазодинамических течений в каналах.– М.: Атомиздат, 1971.
5. Веденяпин В.В. Кинетические уравнения Больцмана и Власова. – М.: Физматлит, 2001.
6. Беляков А.Н. Применение дискретных моделей уравнения Больцмана к описанию совмещенных процессов в технологии измельчения // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2015. Т.58. №. 3. С.73...76.
7. Fukunak T., Golmanb B., Shinohara K. Batch grinding kinetics of Ethenzamide particles by fluidized-bed jet-milling. // International Journal of Pharmaceutics. – 2006, 311. P. 89...96.
8. Palaniandy S., Azizli K., Hussin H., Hashim S. Effect of operational parameters on the breakage mechanism of silica in a jet mill // Minerals Engineering. – 2008, 21. P. 380...388.
9. Berthiaux H., Dodds J. Modeling fine grinding in a fluidized bed opposed jet mill. Part I: batch grinding kinetics // Powder Technology – 1999, 106. P. 78...87.
10. Зельдович Б.Я., Мышкис А.Д. Элементы прикладной математики. – М.: Наука, 1967.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ "Расчет многомерных совмещенных процессов измельчения, классификации в сыпучих средах" № 2010612671 от 19 апреля 2010 года. Авторы: Беляков А.Н., Жуков В.П., Власюк А.А., Барочкин А.Е.
12. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация порошков. – М.: Химия, 1989.

1. Ermilov P.I. Dispergirovanie pigmentov. – М.: Himija, 1971.
2. Komissarov Ju.A., Gordeev L.S., Vent D.P. Processy i apparaty himicheskoj tehnologii. – М.: Himija, 2011.
3. Ajnshtejn V.G. i dr. Obshhij kurs processov i apparatov himicheskoj tehnologii.– М.: Vysshaja shkola, 2002.
4. Vulis L.A. Teorija i raschet magnitogazodinamicheskikh techenij v kanalakh.– М.: Atomizdat, 1971.
5. Vedenjapin V.V. Kineticheskie uravnenija Bol'cmana i Vlasova. – М.: Fizmatlit, 2001.
6. Beljakov A.N. Primenenie diskretnyh modelej uravnenija Bol'cmana k opisaniju sovmeshhennyh processov v tehnologii izmel'chenija // Izv. vuzov. Himija i himicheskaja tehnologija. – 2015. Т.58. №. 3. S.73...76.
7. Fukunak T., Golmanb B., Shinohara K. Batch grinding kinetics of Ethenzamide particles by fluidized-bed jet-milling. // International Journal of Pharmaceutics. – 2006, 311. P. 89...96.
8. Palaniandy S., Azizli K., Hussin H., Hashim S. Effect of operational parameters on the breakage mechanism of silica in a jet mill // Minerals Engineering. – 2008, 21. P. 380...388.
9. Berthiaux H., Dodds J. Modeling fine grinding in a fluidized bed opposed jet mill. Part I: batch grinding kinetics // Powder Technology – 1999, 106. P.78...87.
10. Zel'dovich B.Ja., Myshkis A.D. Jelementy prikladnoj matematiki. – М.: Nauka, 1967.
11. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM "Raschet mnogomernyh sovmeshhennyh processov izmel'chenija, klassifikacii v sypruchih sredah" № 2010612671 ot 19 aprelja 2010 goda. Avtory: Beljakov A.N., Zhukov V.P., Vlasjuk A.A., Barochkin A.E.
12. Mizonov V.E., Ushakov S.G. Ajerodinamicheskaja klassifikacija poroshkov. – М.: Himija, 1989.

Рекомендована кафедрой прикладной математики. Поступила 08.04.16.