

Лебедев Антон Евгеньевич,
ФГБОУВО «Ярославский государственный технический университет», доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теоретических машин и оборудования, e-mail: lae4444@mail.ru
Lebedev Anton Evgenievich,
Yaroslavl State Technical University, D.Sc. of Eng., Associate Professor, Professor of the Department of Theoretical Machines and Equipment, e-mail: lae4444@mail.ru

Мельцер Александр Михайлович,
ЗАО «НПО Регулятор», генеральный директор, e-mail: meltzer.a@mail.ru
Meltzer Aleksandr Mikhailovich,
JSC «Regulyator», General director, e-mail: meltzer.a@mail.ru

Неклюдов Сергей Владимирович,
ЗАО «НПО Регулятор», главный конструктор, кандидат технических наук, e-mail: neklydov.s@nporeg.ru
Neklyudov Sergey Vladimirovich,
JSC «Regulyator», Chief Designer, Ph.D. of Engineering, e-mail: neklydov.s@nporeg.ru

УДК 621.6.04

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЦ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.В. ОГУРЦОВ¹, Ю.В. ХОХЛОВА², В.Е. МИЗОНОВ¹, В.А. ОГУРЦОВ²
¹ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
²ФГБОУВО «Ивановский государственный политехнический университет»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Обогащенный уголь как источник энергии имеет ряд неоспоримых экологических и экономических преимуществ, обладает более высокой теплотворной способностью. Важными характеристиками, оказывающими влияние на технологический процесс флотации угля, являются гранулометрический состав, форма угольных частиц и текстура их поверхности. Ситовой анализ является наиболее распространенным методом для определения гранулометрического состава сыпучих сред. Однако он не является чувствительным к учету формы частиц и характеру их поверхности. При ситовом методе анализа не происходит непосредственного измерения ни одной из осей частицы за исключением случая, когда частица имеет форму шара. В этом случае ее размер совпадает с длиной ребра квадратной ячейки сита. Две частицы совершенно разной формы могут проходить через одно и то же отверстие сита. В связи с этим актуальной является задача разработки простой методики, позволяющей идентифицировать параметры формы и текстуры частиц сыпучего материала.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи используется алгоритм, реализованный в среде MATLAB (пакет Image Processing Toolbox) и концепция фракталов.

Результаты. Предложен метод оценки формы и текстуры частиц сыпучих материалов на основе цифровой обработки изображений. Построены кривые распределения частиц по размерам, полученные методом ситового просеивания и методом обработки изображений. Установлено, что эти кривые хорошо согласуются друг с другом.

Выводы. Таким образом, цифровая обработка изображений является альтернативным вариантом определения важных качественных характеристик сыпучих сред.

Ключевые слова: гранулометрический состав, фрактальная размерность, форма и текстура частиц сыпучего материала, обработка цифровых изображений, ситовой анализ

IDENTIFYING MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SOLID PARTICLES BASED ON DIGITAL IMAGE ANALYSIS

A.V. OGURTZOV¹, Yu.V. KHOKHLOVA², V.E. MIZONOV¹, V.A. OGURTZOV²

¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

²Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: ogurtzovawork@mail.ru

Abstract

Background. Enriched coal as an energy source has a number of undeniable environmental and economic advantages, and has a higher calorific value. Important characteristics that affect the technological process of coal flotation are the particle size distribution, the shape of the coal particles and their surface texture. Screen analysis is the most common method for determining the granulometric composition of granular media. However, it is not sensitive to the shape of the particles and the nature of their surface. With the sieve method of analysis, there is no direct measurement of any axes of the particle, except the case when the particle is ball-shaped. In this case, its size coincides with the edge length of the square mesh of the sieve. Thus, two particles of completely different shapes can pass through the same sieve opening. Our task was to develop a simple technique that allows identifying the shape and texture parameters of particles of the bulk material.

Materials and methods. To solve the problem in question, the algorithm implemented in MATLAB (Image Processing Toolbox) and the concept of fractals are used.

Results. A method for estimating the shape and texture of bulk material particles based on digital image processing has been proposed. The particle size distribution curves are constructed, obtained by sieving method and image processing method. It was found that these curves are in good agreement with each other.

Conclusions. Digital image processing is an alternative to identifying the important quality characteristics of bulk materials.

Key words: granulometric composition, fractal dimension, shape and texture of particles of bulk material, digital image processing, sieve analysis

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.3.064-070

Введение. Сыпучие материалы широко применяются в различных отраслях промышленности, в том числе в энергетической. Так, горючие сланцы, каменный уголь являются источниками энергии ТЭЦ. Как известно, качество добываемого и используемого угольного сырья может быть повышено за счет процесса флотации. Обогащенный уголь имеет ряд неоспоримых экологических и экономических преимуществ, обладает более высокой теплотворной способностью. При этом важными параметрами, оказывающими влияние на технологический процесс флотации, являются гранулометрический состав, форма угольных частиц и текстура их поверхности [1–3]. Размер и форма частиц угля также влияют на их характеристики тепло- и массопереноса [4]. Ситовой анализ является наиболее распространенным методом для определения гранулометрического состава сыпучих сред. Однако он не является чувствительным к учету формы частиц и характеру их поверхности. При ситовом методе анализа не происходит непосред-

ственного измерения ни одной из осей частицы за исключением случая, когда частица имеет форму шара. Ее размер в этом случае совпадает с длиной ребра квадратной ячейки сита. Две частицы совершенно разной формы могут проходить через одно и то же отверстие сита. В связи с этим актуальным является разработка простой методики, позволяющей идентифицировать параметры формы и текстуры частиц сыпучего материала.

Методы исследования. В качестве модельного материала использована песчано-гравийная смесь месторождения «Новинкинское», (Фурмановский район, Ивановская область). Исходное сырье ситовым методом было разделено на несколько классов крупности. Изображения образцов получали при помощи камеры (Nikon D5600, увеличение 0,82x), соединенной с компьютером (рис. 1).

В ходе эксперимента в целях накопления статистических данных для каждой фракции использовалось приблизительно по 300 частиц каждого образца.

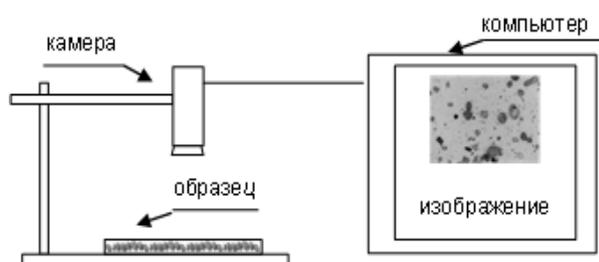


Рис. 1. Схема процесса получения цифровых изображений

Для оценки формы частиц сыпучего материала был использован алгоритм, реализованный в среде MATLAB, пакет Image Processing Toolbox. Это обусловлено тем, что среда MATLAB, разработанная фирмой MathWorks, является языком высокого уровня для выполнения технических и научных вычислений. В ней интегрированы вычисления, визуализация и программирование в удобной для пользователя среде, в которой задачи и их решения представлены с помощью привычных математических выражений – массивов элементов, представленных в матричной форме [5]. Пакет прикладных программ Image Processing Toolbox (IPT) является эффективным инструментом разработки, исследования и моделирования процессов обработки изображений. При разработке методов и алгоритмов обработки изображений пакет IPT позволяет идти двумя путями. Первый из них состоит в самостоятельной программной реализации методов и алгоритмов. Другой путь позволяет моделировать решение задачи с помощью готовых функций, которые реализуют наиболее известные методы и алгоритмы обработки изображений. Однако для исследователей и разработчиков методов и алгоритмов обработки изображений предпочтительным является второй путь. Это объясняется гибкостью таких программ, возможностью изменения всех параметров, что очень актуально при исследовании, разработке, определении параметров регуляризации и т.д. Для решения задач обработки изображений могут быть использованы стандартные функции пакета IPT [5]².

² Дьяконов В., Абраменкова И. MATLAB. Обработка сигналов и изображений: Специальный справочник. – СПб.: ПИТЕР, 2002. – 602 с.; <http://matlab.exponenta.ru>

Разработанный алгоритм оценки формы частиц сыпучего материала включает следующие шаги:

- считывание исходного изображения (функция `imread` – используется для загрузки изображений в рабочее пространство MATLAB);

- перевод исследуемого изображения в бинарный вид (функция `im2b` – для отделения границ частиц от фона). Растровые изображения, используемые в цифровой обработке, представляют собой двумерные массивы, элементы которых (пиксели) содержат информацию о цвете. Изображения в MATLAB делятся на следующие типы: бинарные (черно-белые), полутоновые (в виде оттенков серого, `grayscale`), палитровые (индексированные) и полноцветные. Бинарные изображения представляют собой массив, элементы которого могут принимать лишь два значения – 0 и 1, что очень удобно с точки зрения их обработки. Точкам исследуемого объекта соответствует значение 1, точкам фона – значение 0 (рис. 2);

- пороговая обработка изображения (функция `threshold`), устранение шума – с использованием морфологических функций (`imopen`, `imclose` – морфологическое открытие и закрытие, `strel('disk',R)` – дисковая фильтрация, т.е. создание структурного элемента «диск» с радиусом R) удаляется ненужная информация, например цветовое искажение фона и неравномерная засветка;

- поиск границ частиц с помощью функции `bwboundaries`, которая отслеживает границы объектов на бинарном изображении. Точность выделяемых границ в этом случае зависит от указания оптимального порога бинаризации, определяемого эмпирически;

- определение параметров, необходимых для вычисления степени округлости объектов (площадь, периметр), с помощью функции `regionprops`.

Для характеристики округлости объектов использовался параметр, определяемый по формуле

$$m = \frac{4\pi S}{P^2}, \quad (1)$$

где S – площадь; P – периметр объекта.

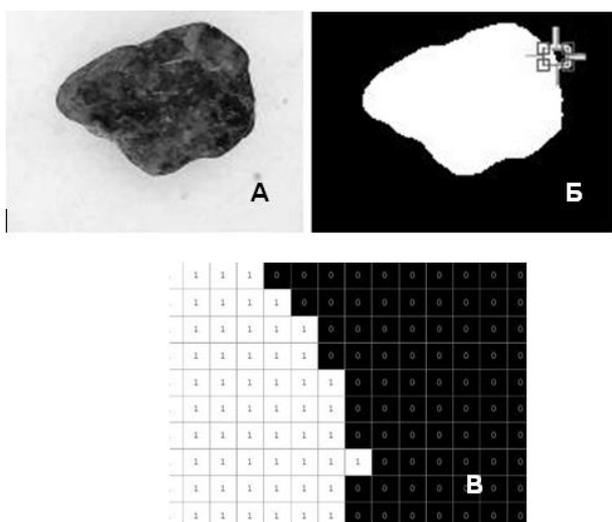


Рис. 2. Представление изображений в бинарном виде: А – исходное изображение частицы; Б – бинарное изображение частицы с выделенной областью; В – изображение со значениями пикселей (0 и 1) выделенной области

Вычисляемый параметр m , степень округлости, равен 1 только в случае идеальной окружности и является меньшим при других формах исследуемого объекта.

Результаты расчетов сохранялись в файл Excel и выполнялась их статистическая обработка. Для лучшего визуального восприятия полученных результатов на бинарном изображении найденные границы частиц выделяли цветом с указанием степени их округлости. Пример исходного и конечного изображения при реализации алгоритма приведен на рис. 3.

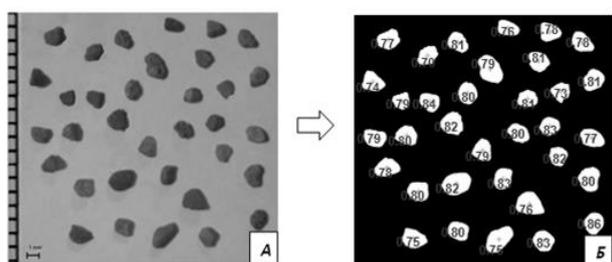


Рис. 3. Результат работы функции для определения степени округлости: А – исходное изображение образца; Б – изображение после обработки в MATLAB с указанием найденных параметров

В качестве количественной оценки текстуры частиц песчано-гравийной смеси была использована концепция фракталов. Фрактальная геометрия была разработана Б. Мандельбортом [6] для описания объектов, обладающих самоподобием и мас-

штабной инвариантностью. Ключевым понятием теории фракталов является понятие дробной величины фрактальной размерности – меры структурности описываемого объекта. Известно, что размерность линии равна 1, поверхность двумерна (размерность равна 2), а объемная фигура – это трехмерный объект (соответственно, размерность равна 3). Фракталы представляют собой фигуры, которые занимают нишу между линией и поверхностью (размерность меняется от 1 до 2) или поверхностью и трехмерной фигурой (размерность варьируется от 2 до 3). Для определения фрактальной размерности частиц песчано-гравийной смеси использован метод подсчета клеток (box-counting method, размерность Минковского) [7]. На предварительно обработанные изображения накладывается сетка ячеек (клеток) со стороной δ . Считается число клеток N , через которые проходит контур изображения. Затем масштаб уменьшается и измерения проводятся заново (рис. 4).

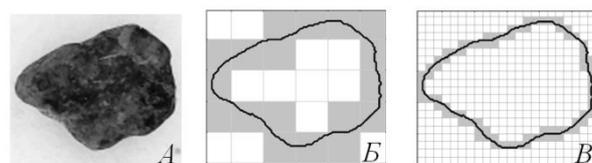


Рис. 4. Процедура определения фрактальной размерности методом box-count: А – исходное изображение; Б, В – покрытие контура изображения ячейками различного размера

Очевидно, что с уменьшением размера δ происходит увеличение числа клеток N , содержащих контур объекта. Далее строится график зависимости N от δ в двойных логарифмических координатах (рис. 5).

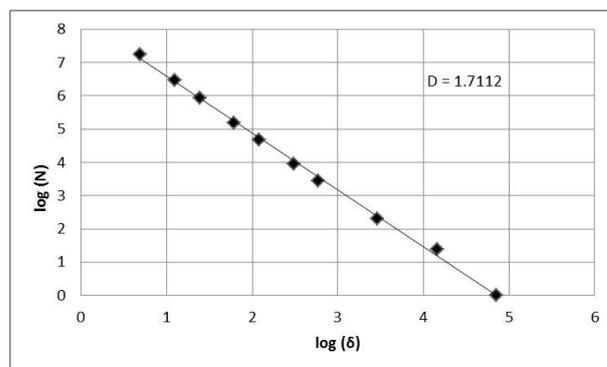


Рис. 5. Пример нахождения фрактальной размерности

Пользуясь методом наименьших квадратов, находим коэффициенты зависимости:

$$\ln(N) = -D \cdot \ln(\delta) + a, \quad (2)$$

где D – искомая фрактальная размерность.

Результаты исследования. Кумулятивные кривые распределения частиц по размерам для ситового анализа и анализа изображений приведены на рис. 6. В табл. 1 для сравнения представлены соответствующие результаты.

Таблица 1. Сравнение результатов измерения размеров частиц

Размер фракции, мм	Содержание фракции, %	
	ситовый анализ	анализ изображений
A (0 - 5)	63,39	60
B (5 - 10)	7,74	8,51
C (10 - 20)	9,61	10,2
D (20 - 40)	9,7	10,8
E (40 - 70)	5,47	6
F (>70)	11,71	4,49

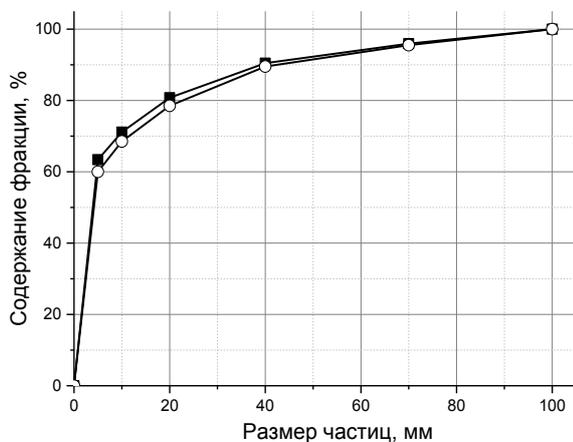


Рис. 6. Кумулятивные кривые распределения частиц по размерам: ■ – ситовый анализ; ○ – анализ изображений

Анализ полученных данных показывает, что результаты обоих методов измерения частиц хорошо согласуются друг с другом.

Для каждой фракции песчано-гравийной смеси найдены и сведены в табл. 2 средние величины степени округлости. Можно убедиться в том, что присутствует небольшой разброс в показателях округлости гранул со средним значением 0,76 по всем рассматриваемым фракциям.

В соответствии с визуальной шкалой, приведенной на рис. 7 [8], можно отнести исследуемые частицы к IV классу с показателем округлости от 0,6 до 0,8.

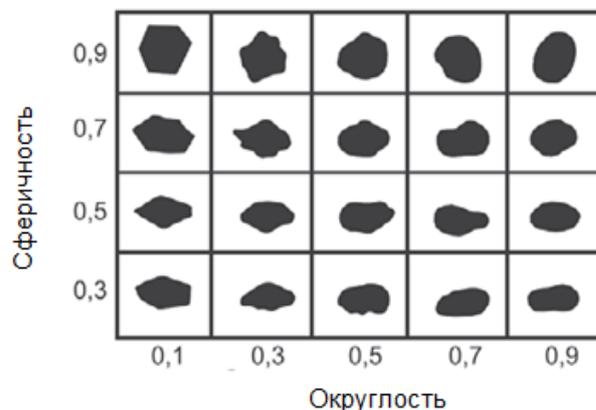


Рис. 7. Визуальная шкала для определения степени округлости и сферичности

Таблица 2. Результаты вычисления степени округлости частиц

Размер фракции, мм	Степень приближения формы частицы к окружности (среднее значение)
A (0 - 5)	0,81
B (5 - 10)	0,8
C (10 - 20)	0,77
D (20 - 40)	0,71
E (40 - 70)	0,74
F (>70)	0,72

Результаты вычисления фрактальной размерности частиц приведены в табл. 3. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что частицы исследуемого материала меньшего размера имеют более гладкую текстуру поверхности, что характерно для частиц песка.

Таблица 3. Результаты вычисления фрактальной размерности частиц

Размер фракции, мм	Фрактальная размерность (среднее значение)
A (0 - 5)	1,6771
B (5 - 10)	1,6934
C (10 - 20)	1,7112
D (20 - 40)	1,7289
E (40 - 70)	1,7193
F (>70)	1,7019

Выводы. Кривые распределения частиц по размерам, полученные методом ситового просеивания и методом обработки изображений, хорошо согласуются друг с другом. Основные показатели качества модельного сыпучего материала – гранулометрический состав, округлость зерен – легко определяются с помощью алгоритма, реализованного в MATLAB на основе обработки цифровых изображений. Принимая во внимание данные факты, можно сделать вывод, что цифровая обработка изображений является альтернативным вариантом определения важных качественных характеристик сыпучих сред.

Список литературы

1. **Техника** и технология обогащения углей / В.В. Беловолов, Ю.Н. Бочков, М.В. Давыдов и др. / под ред. В.А. Чантурия, А.Р. Моляко. – М.: Наука, 1995. – 622 с.
2. **Ahmed M.M.** Effects of comminution on particle shape and surface roughness and their relation to flotation process // *International Journal of Mineral Processing*. – 2010. – Vol. 94, No. 3–4. – P. 180–191.
3. **Particle** shape effects in flotation. Part 1: Microscale experimental observations / D.I. Verrelli, W.J. Bruckard, P.T.L. Koh, et. al. // *Minerals Engineering*. – 2014. – Vol. 58. – P. 80–89.
4. **Ulusoy U., Hiçyılmaz C., Yekeler M.** Role of shape properties of calcite and barite particles on apparent hydrophobicity // *Chemical Engineering and Processing*. – 2004. – Vol. 43, No. 8. – P. 1047–1053.
5. **Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С.** Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
6. **Мандельброт Б.** Фрактальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.

7. **Кроновер Р.М.** Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.

8. **Крумбейн В.К., Слосс Л.Л.** Стратиграфия и осадкообразование. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 411 с.

References

1. Belovolov, V.V., Bochkov, Yu.N., Davydov, M.V. *Tekhnika i tekhnologiya obogashcheniya ugley* [Technique and technology of coal preparation]. Moscow: Nauka, 1995. 622 p.
2. Ahmed, M.M. Effects of comminution on particle shape and surface roughness and their relation to flotation process. *International Journal of Mineral Processing*, 2010, vol. 94, no. 3–4, pp. 180–191.
3. Verrelli, D.I., Bruckard, W.J., Koh, P.T.L., Schwarz, M.P., Follink, B. Particle shape effects in flotation. Part 1: Microscale experimental observations. *Minerals Engineering*, 2014, vol. 58, pp. 80–89.
4. Ulusoy, U., Hiçyılmaz, C., Yekeler, M. Role of shape properties of calcite and barite particles on apparent hydrophobicity. *Chemical Engineering and Processing*, 2004, vol. 43, no. 8, pp.1047–1053.
5. Gonsales, R., Vuds, R., Eddins, S. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v srede MATLAB* [Digital image processing in MATLAB]. Moscow: Tekhnosfera, 2006. 616 p.
6. Mandel'brot, B. *Fraktal'naya geometriya prirody* [Fractal geometry of nature]. Moscow: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2002. 656 p.
7. Kronover, P.M. *Fraktaly i khaos v dinamicheskikh sistemakh. Osnovy teorii* [Fractals and chaos in dynamic systems. Theory Fundamentals]. Moscow: Postmarket, 2000. 352 p.
8. Krumbeyn, V.K., Sloss, L.L. *Stratigrafiya i osadkoobrazovanie* [Stratigraphy and sedimentation]. Moscow: Gostoptekhizdat, 1960. 411 p.

Огурцов Антон Валерьевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики, e-mail: mizonov46@mail.ru

Ogurtsov Anton Valerevich,

Ivanovo State Power Engineering University, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Applied Mathematics, e-mail: mizonov46@mail.ru

Хохлова Юлия Владимировна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный политехнический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры и строительства, e-mail: hohjul@mail.ru

Khokhlova Julia Vladimirovna,

Ivanovo State Polytechnic University, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Architecture and Construction, e-mail: hohjul@mail.ru

Мизонов Вадим Евгеньевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, e-mail: mizonov46@mail.ru
Mizonov Vadim Evgenievich,
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Professor, Department of Applied Mathematics, e-mail: mizonov46@mail.ru

Огурцов Валерий Альбертович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный политехнический университет», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой архитектуры и строительства, e-mail: ogurtzovvawork@mail.ru
Ogurtsov Valery Albertovich,
Ivanovo State Polytechnic University, Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Architecture and Construction, e-mail: ogurtzovvawork@mail.ru

УДК 66.022.54

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ КОМПОНЕНТОВ В РОТАЦИОННОМ АППАРАТЕ

А.Б. КАПРАНОВА, Д.Д. БАХАЕВА, Д.В. СТЕНЬКО, И.И. ВЕРЛОКА
ФГБОУВО «Ярославский государственный технический университет»,
г. Ярославль, Российская Федерация
E-mail: kapranova_anna@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Применение сыпучих композитов, физико-механические свойства которых задаются требованиями регламента конкретной производственной сферы, в том числе атомной и тепловой энергетики, постоянно расширяется. Получение качественных композитных смесей из твердых дисперсных сред связано с рядом трудностей по предотвращению влияния сегрегационных и адгезионных эффектов, что вызывает сложности при выборе способа реализации технологической операции смешивания сыпучих компонентов, типа смесительных элементов, рационального диапазона изменения основных параметров указанного процесса и т.п. Обеспечение эффективного режима смешивания сыпучих компонентов возможно в аппаратах с организацией их разреженных потоков, в частности, с помощью ротационных устройств. Проектирование указанных аппаратов специального назначения связано с математическим моделированием данного процесса как соответствующей теоретической основы.

Материалы и методы. Аналитическое описание смешивания сыпучих материалов при организации разреженных потоков в рабочем объеме ротационного аппарата выполняется в рамках стохастического подхода в приближении равновесного представления состояний энергетически закрытой макро-системы каждого компонента.

Результаты. Энергетическим способом проведен анализ зависимости энергетической характеристики процесса смешивания сыпучих компонентов, выполняемого с помощью ротационных устройств, от режимных и конструктивных параметров данной операции.

Выводы. Выявленная аналитическая взаимосвязь между энергетическими характеристиками каждого разреженного потока сыпучих материалов и параметрами изучаемого процесса позволяет спрогнозировать степень влияния ряда факторов на качество готовой сыпучей смеси.

Ключевые слова: ротационное устройство, процесс смешивания сыпучих материалов, эластичные лопатки, разреженный поток, стохастическая модель