

КЛАССИФИКАЦИЯ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА В МНОГОСЕКЦИОННОМ ВОЗДУШНОМ КЛАССИФИКАТОРЕ

Н.А. Марцулевич, О.М. Флисюк, В.П. Мешалкин, А.В. Гарабаджиу

Николай Александрович Марцулевич, Олег Михайлович Флисюк*, Валерий Павлович Мешалкин, Александр Васильевич Гарабаджиу

Санкт-Петербургский технологический институт (технический университет), Московский пр. 26, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 109013

E-mail: mechanical_faculty@technolog.edu.ru, flissiyk@mail.ru*, vpmeshalkin@gmail.com, gar-54@mail.ru

Статья посвящена разработке математической модели процесса классификации дисперсных материалов в многосекционном, вертикальном воздушном классификаторе. Анализ работы многосекционного вертикального воздушного классификатора проведен с использованием аппарата теории вероятности. Принято допущение, что вероятность того, что частица из данной секции попадет в соседнюю, вышележащую секцию, для всех секций одинакова. Сформулированная таким образом задача о последовательном движении частицы от секции к секции в точности отвечает схеме независимых испытаний Бернулли с двумя исходами: переходом в вышележащую секцию и переходом в нижележащую секцию. В рамках этой схемы все вероятности рассчитываются, исходя из распределения Бернулли. Такой подход позволил получить расчетное соотношение для вероятности попадания частиц в верхний продукт классификатора в зависимости от номера секции, в которую подается исходный материал. Указанное соотношение учитывает также размер частиц, их плотность и скорость газа. Результаты расчетов хорошо согласуются с опытными данными по фракционированию частиц кварцевого песка и порошка диоксида марганца в семисекционном аппарате, что подтверждает адекватность предложенной математической модели. Полученные в работе расчетные соотношения позволяют решить основную задачу процесса классификации, а именно, по известной плотности распределения частиц исходного материала, по размеру и заданной рабочей скорости газа определить дисперсный состав частиц на выходе из классификатора. Кроме того, подбирая рабочую скорость газа и место ввода дисперсного материала в аппарат, можно целенаправленно управлять гранулометрическим составом материала на выходе из аппарата.

Ключевые слова: многосекционный классификатор, фракционирование дисперсного материала, гранулометрический состав

DISPERSED MATERIAL CLASSIFICATION IN MULTI-SECTION AIR CLASSIFIER

N.A. Martsulevich, O.M. Flisyuk, V.P. Meshalkin, A.V. Garabadzhiu

Nicolay A. Martsulevich, Oleg M. Flisyuk*, Valery P. Meshalkin, Alexander V. Garabadzhiu

Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Moskovsky pr., 26, St Petersburg, 190013, Russia

E-mail: Mechanical_faculty@technolog.edu.ru, flissiyk@mail.ru*, vpmeshalkin@gmail.com, gar-54@mail.ru

The article is devoted to the development of a mathematical model for the classification of dispersed materials in a multisection, vertical air classifier. The analysis of the work of the multisection vertical air classifier was carried out using the apparatus of the theory of probability. It is assumed that the probability that a particle from a given section gets into an adjacent, overlying section is the same for all sections. The problem of the sequential motion of a particle from section to section, formulated in this way, exactly corresponds to the Bernoulli scheme of independent tests with two outcomes: a transition to an overlying section and a transition to an underlying section.

In this scheme, all probabilities are calculated based on the Bernoulli distribution. This approach made it possible to obtain a calculated ratio for the probability of particles entering the upper product of the classifier, depending on the number of the section into which the source material is fed. This ratio also takes into account the size of the particles, their density and gas velocity. The calculation results are in good agreement with the experimental data on the fractionation of quartz sand particles and manganese dioxide powder in a seven-section apparatus, which confirms the adequacy of the proposed mathematical model. The calculated ratios obtained in the work make it possible to solve the main problem of the classification process, namely, by the known distribution density of the particles of the initial material by size and the given working gas velocity, to determine the dispersed composition of particles at the exit from the classifier. In addition, by selecting the working gas velocity and the place of introduction of dispersed material into the apparatus, it is possible to purposefully control the granulometric composition of the material at the exit from the apparatus.

Key words: multi-section classifier, dispersed material fractionation, granulometric composition

Для цитирования:

Марцулевич Н.А., Флисюк О.М., Мешалкин В.П., Гарабаджиу А.В. Классификация дисперсного материала в многосекционном воздушном классификаторе. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 10. С. 84–90

For citation:

Martsulevich N.A., Flisyuk O.M., Meshalkin V.P., Garabadzhiu A.V. Dispersed material classification in multi-section air classifier. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 10. P. 84–90

ВВЕДЕНИЕ

Фракционирование дисперсных материалов находит широкое применение в различных отраслях промышленности. Во многих случаях размер частиц является фактором, определяющим эффективность той или иной технологической операции, а также качество продуктов и изделий [1, 2]. Так в производстве изделий методами порошковой металлургии от размера частиц зависят давление прессования, температура спекания, степень усадки, а также механические и другие свойства готовых изделий [3]. Жесткие требования к гранулометрическому составу порошков предъявляются в строительной индустрии и лакокрасочной промышленности [4, 5]. Выделение из полидисперсной смеси сыпучего материала частиц определенного гранулометрического состава представляет собой непростую техническую проблему. В ряде случаев она может быть решена с помощью вибросепарации, гидравлической классификации, с применением электростатического поля [6, 7]. Однако наиболее часто используется воздушная классификация в силу целого ряда преимуществ [8–25]. Более того, воздушная классификация позволяет зачастую утилизировать мелкие фракции твердой фазы. Так, например, для стекольного производства используется только узкая фракция песка 0,3–0,5 мм. Более крупная фракция применяется в качестве фильтрующего материала, а мелкая

идет в отсеив, который представляет собой отход. С помощью воздушной классификации появляется возможность разделить этот отход на несколько более мелких фракций, которые в этом случае используются в производстве сухих строительных смесей и производстве чистящих средств. Разделение с помощью вибросита в этом случае неэффективно, так как сита быстро забиваются и имеют малую производительность, не обеспечивая промышленного масштаба.

При расчете процесса классификации основная задача состоит в том, чтобы при известном дисперсном составе исходного материала и заданных условиях проведения процесса определить дисперсный состав верхнего и нижнего продуктов. Если такая задача решена, то, подбирая рабочую скорость газа и место ввода сыпучего материала в аппарат, можно целенаправленно влиять на распределение частиц по размеру на выходе из классификатора. Ранее [26–28] авторами был построен метод расчета процесса классификации для двухсекционного аппарата, позволяющий связать характеристики гранулометрического состава исходного материала и материала на выходе из аппарата. При этом была использована вероятностная модель движения частиц из секции в секцию, поскольку подход взаимопроникающих континуумов, а также анализ движения отдельной частицы с последующим осреднением на множество частиц не представляются физически убедительными [29–33].

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили адекватность модели и приемлемую точность метода расчета. Цель настоящей статьи состоит в построении метода расчета процесса классификации для аппарата с любым числом разделительных секций.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Пусть имеется вертикальный аппарат, состоящий из n одинаковых секций (рис. 1). Секции нумеруются снизу-вверх. Выходу частицы снизу аппарата соответствует номер секции равный нулю; выходу из верхней части аппарата – номер равный $(n+1)$. Отдельная частица поступает в секцию с номером m ($1 \leq m \leq n$). Вероятность того, что частица из данной секции попадет в соседнюю выше лежащую секцию для всех секций одинакова и равна p , вероятность попадания в соседнюю ниже лежащую секцию равна $1 - p$. Требуется найти вероятность $P(m)$ вылета частицы из аппарата через верхнюю секцию и зависимость этой величины от номера m . Сформулированная таким образом задача о последовательном движении частицы от секции к секции в точности отвечает схеме независимых испытаний Бернулли с двумя исходами: переходом в вышележащую секцию и переходом в нижележащую секцию. В рамках этой схемы все вероятности рассчитываются, исходя из распределения Бернулли. Именно, если частица совершила r переходов между секциями, то вероятность того, что среди этих переходов будет k переходов в выше лежащую секцию, задается формулой:

$$P_r^k = C_r^k p^k (1 - p)^{r-k}, \quad (1)$$

где C_r^k – число сочетаний из r элементов по k .

Пусть частица в соответствии с приведенной постановкой задачи начинает движение в секции с номером m . Определим вероятность попадания частицы в секцию $(n+1)$ после ровно r переходов ($r \geq n+1-m$) в зависимости от номера m при условии, что она ни разу при своем «блуждании» не попадет ни в секцию 0, ни в секцию $(n+1)$, т.е. не выйдет из аппарата ни снизу, ни сверху. При этом из этих r переходов k переходов будут совершены вверх, а $(r-k)$ – вниз. Чтобы частица достигла секции $(n+1)$, требуется выполнение условия: $k - (r-k) = n+1-m$, т.е. число переходов вверх связано с числом секций в аппарате и номером начальной секции следующим соотношением:

$$k = (r + n + 1 - m)/2. \quad (2)$$

Таким образом, вероятность перехода частицы из секции с номером m в секцию с номером

$(n+1)$, при общем числе переходов равным r , задается соотношением (1), в котором величина k определяется выражением (2).

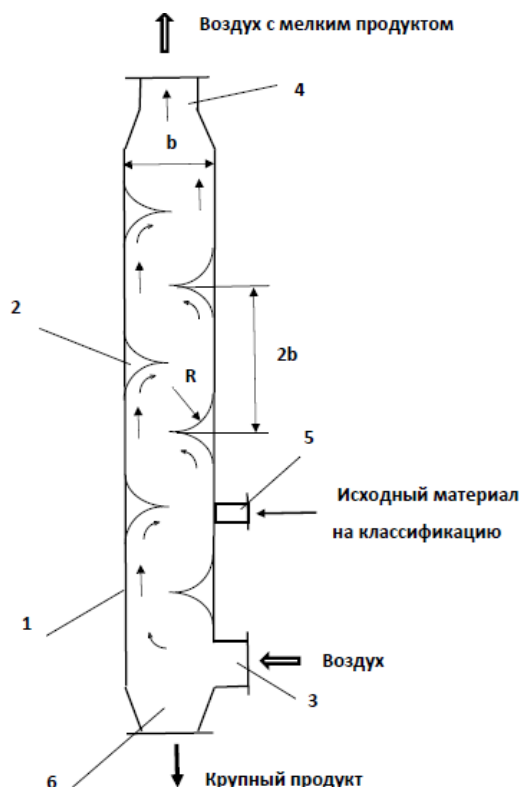


Рис. 1. Схема классификатора
Fig. 1. Classifier scheme

Переходы частицы из секции в секцию удобно интерпретировать в терминах траекторий движения. Тогда величину C_r^k следует воспринимать как число возможных траекторий частицы от входной секции аппарата до выхода из него через верхний штуцер. Однако среди этих C_r^k траекторий могут быть такие траектории, при которых частица при своем движении попадает в секцию с номером нуль, т.е. выходит из аппарата через нижний штуцер. В силу сформулированной задачи такие траектории следует исключить. Найдем число траекторий, проходящих через нулевую секцию, используя принцип «зеркального отражения». Именно, каждой траектории, которая начинается в секции с номером m , заканчивается в секции с номером $(n+1)$ и проходит через нулевую секцию, поставим в соответствие траекторию, которая начинается в условной секции с номером $(-m)$, заканчивается в секции с номером $(n+1)$ и построена следующим образом. Начальная часть этой траектории от секции $(-m)$ до секции с номером 0 представляет собой «зеркальное отражение» исходной траектории относительно нулевой секции, а оставшиеся части

обеих траекторий полностью совпадают. Такое построение «отраженных» траекторий обеспечивает взаимно однозначное соответствие между прямыми и обратными траекториями.

Определим число «отраженных» траекторий. Пусть k_1 – число переходов вверх частицы у некоторой такой траектории. Тогда $(r - k_1)$ – число переходов вниз. Чтобы частица из секции $(-m)$ попала в секцию $(n + 1)$, должно выполняться равенство: $k_1 - (r - k_1) = n + 1 + m$. Отсюда

$$k_1 = (r + n + 1 + m)/2 = k + m$$

Следовательно, искомое число «отраженных» траекторий равно $C_r^{k_1} = C_r^{k+m}$. Вычитая его из общего числа возможных траекторий частицы, получаем выражение для вероятности того, что частица, попадая в аппарат через секцию m , покинет его через верхний штуцер:

$$P_r(m) = (C_r^k - C_r^{k+m})p^k(1-p)^{r-k}, \quad (3)$$

где k определяется соотношением (2). При этом величина k может быть только целой.

Рассуждая аналогичным образом, исключим те траектории частицы, при которых она достигает секции $(n + 1)$ менее, чем за r переходов. В этом случае требуется определить число траекторий, начальная часть которых отражена относительно секции $(n + 1)$. Такие траектории начинаются в условной секции $2(n + 1) - m$, проходят через секцию $(n + 1)$ при некотором промежуточном числе переходов и заканчиваются вновь в секции $(n + 1)$. Пусть k_2 – количество переходов вниз частицы у некоторой такой траектории. Тогда $(r - k_2)$ – число переходов вверх. Чтобы частица из секции $2(n + 1) - m$ попала в секцию $(n + 1)$, должно выполняться равенство: $k_2 - (r - k_2) = n + 1 - m$. Отсюда

$$k_2 = (r + n + 1 - m)/2 = k. \text{ Следовательно,}$$

число искомых траекторий равно

$$C_r^{k_2} = C_r^k, \text{ а вероятность их реализации } C_r^k p^{r-k} (1-p)^k.$$

Суммируя выражение по всем возможным значениям r ($r \geq n + 1 - m$), получим выражение для вероятности попадания частицы в верхний продукт, если ее движение началось из секции с номером m :

$$P(m) = \sum_{i=0}^{\infty} C_{n+1-m+2i}^{n+1-m+i} [p^{n+1-m+i}(1-p)^i - (1-p)^{n+1-m+i} p^i] - \sum_{i=m}^{\infty} (C_{n+1-m+2i}^{n+1-m+i} - C_{n+1-m+2i}^{n+1+i}) p^{n+1-m+i} (1-p)^i \quad (4)$$

Вторая сумма учитывает тот факт, что траектории частицы с заходом в нулевую секцию могут существовать только при условии, что общее число переходов между секциями будет не меньше величины $n + 1 + m$. Несмотря на внешнюю гро-

моздность выражения (4), при конкретных значениях числа секций в аппарате (n) и номера входной секции (m) оно выглядит намного проще. Кроме того, при практическом использовании следует учесть, что слагаемые в суммах быстро убывают с увеличением номера i , и при расчетах достаточно удерживать несколько первых членов сумм, чтобы обеспечить приемлемую точность.

Выражение (4) содержит также основную характеристику классификатора p – вероятность перехода частицы из данной секции в соседнюю выше лежащую секцию. Величина p зависит от геометрии секций, скорости газового потока, размера, формы и плотности частицы. В каждом конкретном случае она может быть определена только экспериментально. В работе [17] было показано, что вероятность p определяется численным значением безразмерного комплекса

$$Fr = \frac{w^2}{gd} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_s}, \quad (5)$$

в котором g – ускорение свободного падения, м/с², ρ_g, ρ_s – плотность газа и частицы соответственно, кг/м³, w – скорость газа, м/с, d – характерный размер частицы, м. Комплекс (5) с точностью до второго сомножителя совпадает с классическим критерием Фруда. В этой же работе изложена методика экспериментального определения зависимости $p = p(Fr)$. Она состоит в отдувке навески монодисперсного материала в одной секции классификатора при разных скоростях газового потока. При этом вероятность $p(Fr)$ при конкретном значении критерия Fr оценивалась как отношение массы частиц, вылетевших из секции с потоком воздуха, к общей массе частиц, подаваемых в аппарат. Для классификатора, конструкция которого описана в работе [16], график $p = p(Fr)$ приведен на рис. 2.

Явный вид функции $p(Fr)$ позволяет установить при заданной скорости газа зависимость вероятности $P(m)$ не только от номера входной секции, но и от размера частиц: $P = P(m, d)$. Это, в свою очередь, дает возможность решить основную задачу при расчете процесса классификации – найти дисперсный состав верхнего или нижнего продуктов при заданном гранулометрическом составе исходного дисперсного материала. Действительно, пусть $f_0(d)$ – плотность распределения вероятности частиц по размеру в исходном материале. Тогда $N f_0(d) \delta d$ – число поступивших в рабочий объем частиц, размер которых лежит в интервале $(d, d + \delta d)$, где N – число частиц, поступающих во входную секцию в единицу времени. Из них $N P(m, d) f_0(d) \delta d$ покинет аппарат через верх, а $N(1 - P$

$(m, d) f_0(d) \delta d$ – через низ. Полное количество частиц из числа N , которые вылетят из рабочего объема сверху равно:

$$\int_0^{\infty} NP(m, d) f_0(d) \delta d$$

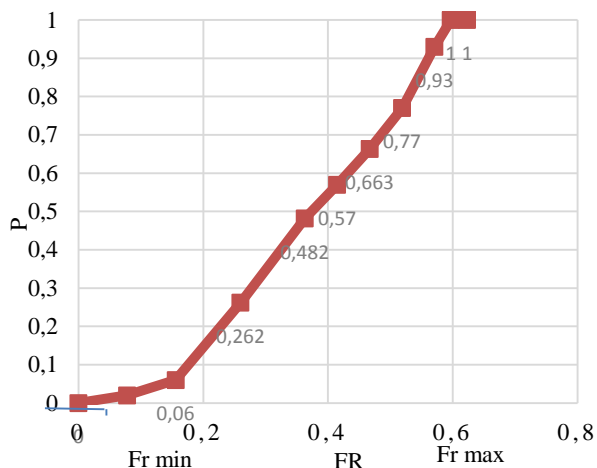


Рис. 2. Зависимость вероятности вылета частицы через верх отдельной секции от числа Fr

Fig. 2. The dependence of the probability of the particle departure through the top of a separate section on the number Fr

Количество частиц, вылетевших сверху, размер которых не превышает d , равно:

$$\int_0^d NP(m, d) f_0(d) \delta d$$

Тогда функция распределения частиц по размеру $\Phi_m(d)$ для частиц, покидающих рабочую зону сверху, при подаче материала в секцию с номером m будет иметь вид:

$$\Phi_m(d) = \frac{\int_0^d \mathcal{P}(m, d) f_0(d) \delta d}{\int_0^{\infty} \mathcal{P}(m, d) f_0(d) \delta d}. \quad (6)$$

Полученное соотношение позволяет спрогнозировать дисперсный состав верхнего продукта в зависимости от места подачи исходного материала в классификатор. Очевидно, что он определяется поведением функции $P(m)$.

В таблице приведены теоретические и экспериментальные значения этой функции для аппарата с семью секциями при $p = 0,5$. Теоретические

значения вероятности рассчитывались по формуле (4). Опытные значения получены в результате осреднения по пяти измерениям для каждого номера секции. В экспериментах использовалась навеска массы около 100 г практически монодисперсного материала (песка) с размером частиц 150-160 мкм. Скорость воздуха в наиболее узком сечении классификатора составляла 0,75 м.

Таблица

Значения вероятности попадания частиц в верхний продукт в зависимости от номера входной секции
Table. Values of the probability of particles entering the upper product, depending on the number of the input section

Номер входной секции	Расчетное значение вероятности $P(m)$	Опытное значение вероятности $P(m)$
1	0,23	0,21
2	0,32	0,30
3	0,41	0,39
4	0,5	0,48
5	0,59	0,59
6	0,68	0,70
7	0,77	0,8

Аналогичные результаты были получены при классификации порошка диоксида марганца.

ВЫВОДЫ

Приведенные в таблице результаты позволяют сделать ряд важных выводов. Во-первых, место подачи исходного материала во многом определяет результат классификации. Во-вторых, зная плотность распределения вероятности частиц по размеру, можно ответить на любой вопрос относительно фракционного состава дисперсного материала на выходе классификатора. В-третьих, выбор рабочей скорости воздуха в классификаторе влияет на процесс разделения посредством зависимости $p = p(Fr)$. Подбирая величину рабочей скорости, можно целенаправленно влиять на фракционный состав верхнего и нижнего продуктов.

Исследование выполнено за счет гранта Российской научной фонды (проект 21-79-30029).

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project 21-79-30029).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мешалкин В.П. Введение в инжиниринг энергоресурсосберегающих химико-технологических систем. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2020. 212 с.
2. Мешалкин В.П., Шинкевич А.И., Мальшева Т.В. Системный анализ эффективности использования вторичных энергоресурсов в круговой экономике. *Изв. вузов.*

REFERENCES

1. Meshalkin V.P. Introduction to the engineering of energy-saving chemical- technological systems. M.: RKhTU im. D.I. Mendeleev. 2020. 212 p. (in Russian).
2. Meshalkin V.P., Shinkevich A.I., Malysheva T.V. System analysis of the efficiency of secondary energy resources use in circular economy. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn.*

- Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 8. С. 79-89. DOI: 10.6060/ivkkt.20216408.6433.
3. **Попивненко Л.В., Щасная К.О.** Анализ факторов, определяющих прочность формуемых порошковых материалов в закрытых пресс-формах. *Обработка материалов давлением.* 2017. Т. 44. № 1. С. 164-172.
 4. **Богданов В.С.** Процессы измельчения и классификации в производстве цемента. М.: Изд-во АСВ. 2004. 199 с.
 5. **Бархатов В.И., Добровольский И.П., Капкаев Ю.Ш.** Отходы производств и потребления – резерв строительных материалов. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та. 2017. 477 с.
 6. **Shapiro M., Galperin V.** Air classification of solid particles: a review. *Chem. Eng. Process.* 2005. 44. P. 279–285. DOI: 10.1016/j.cep.2004.02.022.
 7. **Denisov V.A., Girov D.K.** Mathematical modeling of the particle classification process in an electrostatic field. *Chem. Phys. Mesoscopy.* 2010. V. 12. N 1. P. 36-40.
 8. **Веригин А.Н., Данильчук В.С., Незамаев Н.А.** Машины и аппараты переработки дисперсных материалов. Основы проектирования. СПб.: «Лан». 2018. 536 с.
 9. **Feng Y.G., Liu J.X., Liu S.Z.** Effects of operating parameters on flow field in a turbo air classifier. *Miner. Eng.* 2008. 21. P. 598–604. DOI: 10.1016/j.mineng.2007.11.008.
 10. **Беляков А.Н., Жуков В.П.** Влияние концентрации твердой фазы на эффективность аэродинамической классификации. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2012. Т. 55. Вып. 2. С. 89-92.
 11. **Юровская М.А., Смирнов Д.Е., Сугак А.В., Леонтьев В.К.** Экспериментальные исследования коллектора-классификатора пыли. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2014. Т. 57. Вып. 10. С. 84-86.
 12. **Жуков В.П., Беляков А.Н.** Влияние режимных и конструктивных параметров на эффективность аэродинамической классификации. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2012. Т. 55. Вып. 1. С. 108-111.
 13. **Гальперин В.И.** Воздушная классификация сыпучих материалов. М.: 2006. 88 с.
 14. **Пономарев В.Б.** Применение пневматических каскадных классификаторов для фракционирования тонкодисперсных порошков. Инновации в материаловедении и металлургии : матер. II междунар. интерактив. науч.-практ. конф. 17-21 декабря 2012 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2012. С. 64-66.
 15. **Eswaraiah C., Sunil R.K., Tripathy K., Filippov L.O.** Particle Classification Optimization of a Circulating Air Classifier. *Mineral Proces. Extract. Metall. Rev.* 2019. V. 40. P. 314-322. DOI: 10.1080/08827508.2019.1643340.
 16. **Lai W.H., Lu W.F., Chen C.C.** The new expression of the effectiveness of powder classification. *Adv. Powder Technol.* 2005. 16. P. 611–620. DOI: 10.1163/156855205774483352.
 17. **Lillotte T.D., Bebernik P., Wagner K.G.** A novel approach to determine the granule density of milled ribbons using multi-stage air classification combined with dynamic image analysis. *Powder Technol.* 2021. V. 381. P. 685-697. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.12.023.
 18. **Johansson R., Evertsson M.** CFD simulation of a gravitational air classifier. *Minerals Eng.* 2012. 33. P. 20–26. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.01.007.
 19. **Yanyan Li, Xixi Zhang, Xiaozhong Shen, Haisheng Li, Ke Gao.** Experiment and simulation study on optimized structure of a gravitational air classifier. *Internat. J. Mineral Proces.* 2015. 141. P. 44–50. DOI: 10.1016/j.minpro.2015.06.007.
 3. **Popivnenko L.V., Shchasnaya K.O.** Analysis of the Factors Determining the Strength of Formable Powder Materials in Closed Molds. *Obrabotka Materialov Davleniem.* 2017. V. 44. N 1. P. 164-172 (in Russian).
 4. **Bogdanov V.S.** Grinding and classification processes in cement production: training manual. M.: Izd-vo ASV. 2004. 199 p. (in Russian).
 5. **Barkhatov V.I., Dobrovolskiy I.P., Kapkaev Yu.Sh.** Waste from production and consumption - a reserve of building materials. Chelyabinsk: Izd. Chelyab. Gos. Univ. 2017. 477 p. (in Russian).
 6. **Shapiro M., Galperin V.** Air classification of solid particles: a review. *Chem. Eng. Process.* 2005. 44. P. 279–285. DOI: 10.1016/j.cep.2004.02.022.
 7. **Denisov V.A., Girov D.K.** Mathematical modeling of the particle classification process in an electrostatic field. *Chem. Phys. Mesoscopy.* 2010. V. 12. N 1. P. 36-40.
 8. **Verigin A.N., Danil'chuk V.S., Nezamaev N.A.** Machines and apparatuses for processing dispersed materials. Design basics. SPb.: «Lan». 2018. 536 p. (in Russian).
 9. **Feng Y.G., Liu J.X., Liu S.Z.** Effects of operating parameters on flow field in a turbo air classifier. *Miner. Eng.* 2008. 21. P. 598–604. DOI: 10.1016/j.mineng.2007.11.008.
 10. **Belyakov A.N., Zhukov V.P.** Influence of solid phase concentration on efficiency of aerodynamic classification. *ChemChemTech. [Izv.Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2012. V. 55. N 2. P. 89-92 (in Russian).
 11. **Yurovskaya M.A., Smirnov D.E., Sugak A.V., Leontiev V.K.** Experimental studies of collector-classifier of dust. *ChemChemTech. [Izv.Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2014. V. 57. N 10. P. 84-86 (in Russian).
 12. **Zhukov V.P., Belyakov A.N.** Influence of regime and design parameters on efficiency of aerodynamic classification. *ChemChemTech. [Izv.Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2012. V. 55. N 1. P. 108-111 (in Russian).
 13. **Galperin V.I.** Air classification of bulk materials. M. 2006. 88 p. (in Russian).
 14. **Ponomarev V.B.** Application of pneumatic cascade classifiers for fractionation of fine powders. Innovations in materials science and metallurgy: mater. of the II internat. Interact. Sci.-Pract. Conf. December 17-21. Yekaterinburg. 2012. P. 64-66.
 15. **Eswaraiah C., Sunil R.K., Tripathy K., Filippov L.O.** Particle Classification Optimization of a Circulating Air Classifier. *Mineral Proces. Extract. Metall. Rev.* 2019. V. 40. P. 314-322. DOI: 10.1080/08827508.2019.1643340.
 16. **Lai W.H., Lu W.F., Chen C.C.** The new expression of the effectiveness of powder classification. *Adv. Powder Technol.* 2005. 16. P. 611–620. DOI: 10.1163/156855205774483352.
 17. **Lillotte T.D., Bebernik P., Wagner K.G.** A novel approach to determine the granule density of milled ribbons using multi-stage air classification combined with dynamic image analysis. *Powder Technol.* 2021. V. 381. P. 685-697. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.12.023.
 18. **Johansson R., Evertsson M.** CFD simulation of a gravitational air classifier. *Minerals Eng.* 2012. 33. P. 20–26. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.01.007.
 19. **Yanyan Li, Xixi Zhang, Xiaozhong Shen, Haisheng Li, Ke Gao.** Experiment and simulation study on optimized structure of a gravitational air classifier. *Internat. J. Mineral Proces.* 2015. 141. P. 44–50. DOI: 10.1016/j.minpro.2015.06.007.

20. **Varukha D.A., Smirnov V.A., Edl M., Demianenko M.M., Yukhymenko M.P., Pavlenko I.V., Liaposhchenko O.O.** Modelling of Separation and Pneumatic Classification Processes of Airodisperse Systems in the Shelf Device. *J. Eng. Sci.* 2018. V. 5. Iss. 1. DOI: 10.21272/jes.2018.5(1).f2.
21. **Yoshida T., Hirai Y., Sakai S.** Meta-model of vertical air classification: A unified understanding of different separation curve models. *Powder Technol.* 2021. V. 383. P. 522-535. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.10.093.
22. **Ataş S., Tekir U., Paksoy M.A., Çelik A., Çam M, Sevgel T.** Numerical and experimental analysis of pulverized coal mill classifier performance in the Soma B Power Plant. *Fuel Proces. Technol.* 2014. 126. P. 441–452. DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.05.016.
23. **Johansson R.** Air Classification of Fine Aggregates. Göteborg. 2014. 76 p.
24. **Mann H., Roloff C., Hagemeyer T., Thévenin D., Tomas J.** Model-based experimental data evaluation of separation efficiency of multistage coarse particle classification in a zig-zag apparatus. *Powder Technol.* 2017. V. 313. P. 145-160. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.03.003.
25. **Eswaraiah C., Narayanan S., Jayanti S.** A reduced efficiency approach-based process model for a circulating air classifier. *Chem. Eng. Proces: Process Intensification.* 2008. 47(9-10). P. 1887-1900. DOI: 10.1016/j.ccep.2007.10.016.
26. **Марцулевич Н.А., Флисюк О.М.** Вероятностная модель классификации воздуха. Традиции и инновации. Матер. науч. конф. 22-23 ноября 2018 г. СПб. 2018. С. 142.
27. **Чиркунова У.Г., Марцулевич Н.А.** Воздушный классификатор новой конструкции для фракционирования дисперсных материалов. Сб. тез. IX науч.-практич. конф. 1-3 апреля 2019 г. СПб. 2019. С. 236.
28. **Чиркунова У.Г., Марцулевич Н.А., Флисюк О.М.** Фракционирование дисперсного материала в двухсекционном воздушном классификаторе. *Изв. СПбГТИ(ТУ).* 2020. № 53(79). С. 61-64. DOI: 10.36807/1998-9849-2020-53-79-61-64.
29. **Кантюков Р.А., Мешалкин В.П., Гимранов Р.К., Рыженков И.В.** Анализ применимости гидродинамических моделей течений газовых потоков в сложных трубопроводах. *Вестн. ИКХТ.* 2015. Т. 18. № 3. С. 222-225.
30. **Чиркун Д.И., Саевич Н.П., Левданский А.Э., Ярмолик С.В.** Моделирование процесса классификации полидисперсных материалов методами вычислительной гидродинамики. *Тр. БГТУ.* 2017. Сер. 2. № 2. С. 190-194.
31. **Францкевич В.С., Волк А.М.** Определение граничного размера разделения в воздушных динамических классификаторах. *Тр. БГТУ.* 2019. Сер. 2. № 1. С. 62-66.
32. **Мизонов Е.В., Калинин С.Н., Баранцева Е.А., Бертио Х., Жуков В.П.** Нелинейная клеточная модель классификации силы тяжести. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2005. Т. 48. Вып. 1. С. 122 -124.
33. **Данильчук В.С., Веригин А.Н., Ратасеп М.А.** Модель гравитационной классификации в аппаратах с ячеечной структурой. *Изв. СПбГТИ(ТУ).* 2018. № 46. С. 107-113.
20. **Varukha D.A., Smirnov V.A., Edl M., Demianenko M.M., Yukhymenko M.P., Pavlenko I.V., Liaposhchenko O.O.** Modelling of Separation and Pneumatic Classification Processes of Airodisperse Systems in the Shelf Device. *J. Eng. Sci.* 2018. V. 5. Iss. 1. DOI: 10.21272/jes.2018.5(1).f2.
21. **Yoshida T., Hirai Y., Sakai S.** Meta-model of vertical air classification: A unified understanding of different separation curve models. *Powder Technol.* 2021. V. 383. P. 522-535. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.10.093.
22. **Ataş S., Tekir U., Paksoy M.A., Çelik A., Çam M, Sevgel T.** Numerical and experimental analysis of pulverized coal mill classifier performance in the Soma B Power Plant. *Fuel Proces. Technol.* 2014. 126. P. 441–452. DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.05.016.
23. **Johansson R.** Air Classification of Fine Aggregates. Göteborg. 2014. 76 p.
24. **Mann H., Roloff C., Hagemeyer T., Thévenin D., Tomas J.** Model-based experimental data evaluation of separation efficiency of multistage coarse particle classification in a zig-zag apparatus. *Powder Technol.* 2017. V. 313. P. 145-160. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.03.003.
25. **Eswaraiah C., Narayanan S., Jayanti S.** A reduced efficiency approach-based process model for a circulating air classifier. *Chem. Eng. Proces: Process Intensification.* 2008. 47(9-10). P. 1887-1900. DOI: 10.1016/j.ccep.2007.10.016.
26. **Martculevich N. A., Flisyuk O.M.** Probabilistic model of air classification. Tradition and innovation. Mater. of the sci. conf. November 22-23. SPb. 2018. P. 142 (in Russian).
27. **Chirkunova U.G., Martzulevich N.A.** Air classifier of a new design for fractionation of dispersed materials. Coll. of abs. IX sci. and pract. Conf. April 1-3. SPb. 2019. P. 236 (in Russian).
28. **Chirkunova U.G., Martzulevich N.A., Flisyuk O.M.** Fractionation of dispersed material in a two-section air classifier. *Izv. SPbGTI(TU).* 2020. N 53 (79). P. 61-64 (in Russian). DOI: 10.36807/1998-9849-2020-53-79-61-64.
29. **Kantyukov R.A., Meshalkin V.P., Gimranov R.K., Ryzenkov I.V.** Analysis of the applicability of hydrodynamic models of gas flows in complex pipelines. *Vestn. IKHT.* 2015. V. 18. N 3. P. 222-225 (in Russian).
30. **Chirkun D.I., Saevich N.P., Levdansky A.E., Yarmolik S.V.** Modeling the classification process for polydisperse materials methods of computational fluid dynamics. *Tr. BGTU.* 2017. Ser. 2. N 2. P 190-194 (in Russian).
31. **Frantskevich V.S., Volk A.M.** Determining the bounding size separation in air dynamic classifiers. *Tr. BGTU.* 2019. Ser. 2. N 1. P. 62-66 (in Russian).
32. **Mizonov E.V., Kalinin S.N., Barantseva E.A., Berthiaux H., Zhukov V.P.** A non-linear cell model of gravity classification. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2005. V. 48. N 1. P. 122 -124 (in Russian).
33. **Danilchuk V.S., Verigin A.N., Ratasep M.A.** Model of gravitational classification in devices with a cell structure. *Izv. SPbGTI(TU).* 2018. N 46. P. 107-113 (in Russian).

Поступила в редакцию 28.05.2021
Принята к опубликованию 05.08.2021

Received 28.05.2021
Accepted 05.08.2021