

УДК 621.928.6

Д. И. Чиркун, Н. П. Саевич, А. Э. Левданский, С. В. Ярмолик
Белорусский государственный технологический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КЛАССИФИКАЦИИ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

В результате проведенных исследований смоделировано движение воздуха с твердыми частицами в новой конструкции двухступенчатого гравитационного классификатора. Установлен и изучен поперечно-поточный характер движения воздуха и твердых частиц в аппарате. Изучено влияние на сопротивление классификатора средней по отношению к поперечному сечению скорости воздуха и частоты вращения сепарирующего колеса, при аппроксимации полученных зависимостей квадратной параболой получено значение коэффициента сопротивления. Рассчитан граничный размер разделения частиц при моделировании классификации кварцевого песка и сопоставлен с результатами экспериментальных исследований. Установлена удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных значений. Разработанную модель можно использовать для расчета процесса классификации сыпучих полидисперсных материалов.

Ключевые слова: модель, гидродинамика, сепарация, аппарат, частица, конструкция.

D. I. Chirkun, N. P. Saevich, A. E. Levdanskiy, S. V. Yarmolik
Belarusian State Technological University

SIMULATION OF THE PROCESS OF CLASSIFICATION OF POLYDISPERSED MATERIALS BY METHODS OF COMPUTATIONAL HYDRODYNAMICS

As a result of researches movement of air with firm particles in a new design of the two-level gravitational qualifier is simulated. Cross-section-line character of movement of air and firm particles in the device is investigated. Influence on resistance of the qualifier of average in relation to cross-section section of speed of air and frequency of rotation of a separating wheel is investigated, at approximation of the received dependences by a square parabola value of factor of resistance is received. The boundary size of division of particles is calculated at modelling of classification of quartz sand and compared with results of experimental researches. Satisfactory convergence of settlement and experimental values is received. The developed model can be used for calculation of process of classification of loose polydisperse materials.

Key words: model, hydrodynamics, separation, apparatus, particle, structure.

Введение. Классификаторы в промышленности служат для получения порошков требуемого гранулометрического состава. Технологическая задача процесса классификации сводится к разделению исходного полидисперсного материала на два или более классов крупности.

Авторами статьи разработана, запатентована и экспериментально исследована новая конструкция воздушного гравитационного классификатора с двумя ступенями разделения: гравитационной и отбойно-вихревой [1, 2]. Эксперименты доказали высокую эффективность разработанного аппарата при классификации кварцевого песка, гипса, сильвинита. Однако отсутствие надежных методов технологического расчета аппаратов данного типа требует проведения дополнительных экспериментальных исследований для корректировки режимных параметров классификатора при изменении характеристик разделяемого материала и размеров классификатора.

Поэтому целью дальнейших исследований являлось моделирование движения воздушного

потока с полидисперсными твердыми частицами в классификаторе для получения данных о влиянии технологических, конструктивных параметров аппарата на процесс разделения в целом и граничный размер разделения в частности.

Основная часть. Среди классических методов моделирования аэродинамической классификации выделяются два основных – детерминированный и стохастический.

Стохастические модели основаны на использовании теории вероятности для расчета направления движения частиц различного размера в рабочем объеме классификатора. Наиболее существенные результаты в этом направлении получены М. Д. Барским [3] и В. Е. Мизоновым [4] при исследовании гравитационных и центробежных классификаторов.

Детерминированные модели базируются на дифференциальных уравнениях движения сыпучей среды и несущего потока.

Долгое время, до начала 90-х гг. прошлого века, детерминированные модели не находили широкого применения. Это обусловлено тем,

что в детерминированных моделях принималась масса допущений, связанных с невозможностью учета многих случайных факторов, таких как турбулентные пульсации потока, столкновения частиц между собой и элементами аппаратов. Кроме того, игнорировалось взаимное влияние потока твердой фазы и газообразной друг на друга, сложно моделировался ламинарный пограничный слой вблизи неподвижной стенки. В результате точность детерминированных моделей была относительно невысока.

В настоящее время развитие научных подходов математического описания турбулентных вихрей и пограничного слоя, совместного движения твердой, жидкой и газообразной фаз позволяет с высокой точностью численно моделировать одно- и многофазные течения. Вычислительные мощности современных компьютеров позволяют получать решение в сжатые сроки. Поэтому детерминированные модели в гидродинамике находят все большее применение, доказательством чего является использование программных комплексов Ansys Fluent, Flow Vision и т. п. такими компаниями, как Boeing, Airbus, Mercedes, BMW, DCNS и др.

Конструкция классификатора представляет собой вертикальный цилиндрический пустотелый корпус с пересыпными элементами. Осесимметрично корпусу установлен вал с распределительными дисками. В верхней части корпуса смонтировано сепарирующее колесо. Более подробно аппарат описан в статье [2].

При работе классификатора воздух поднимается в полом корпусе снизу вверх, обтекает вращающийся вал с распределительными дисками, пронизывает слой частиц, сходящих с пересыпных элементов корпуса и распределительных дисков, подхватывает мелкие и легкие частицы, проходит через вращающееся сепарирующее колесо и направляется в циклон для отделения мелкой фракции (мелкого класса). Крупные частицы под действием сил тяжести движутся вниз и попадают в крупную фракцию (крупный класс). Частицы граничного или близкого к нему размера могут некоторое время циркулировать в рабочем объеме классификатора и попадать в тот или другой класс крупности случайно. Поэтому для повышения четкости разделения в классификаторе служит сепарирующее колесо, которое при вращении препятствует попаданию в мелкий продукт крупных частиц.

В первую очередь при исследовании было смоделировано движение чистого воздуха в классификаторе. Для этого использовалось уравнение Навье – Стокса для вязких сред, которое в векторной форме записывается как

$$\rho \frac{d\mathbf{c}}{dt} = \mathbf{M} - \text{grad}p + \mu \Delta \mathbf{c}, \quad (1)$$

где ρ – плотность среды, кг/м³; \mathbf{c} – вектор скорости; \mathbf{M} – вектор массовых сил; p – давление, Па; μ – динамическая вязкость, Па · с; Δ – оператор Лапласа.

Уравнение Навье – Стокса дополнялось уравнением неразрывности потока

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{\mathbf{c}}) = 0 \quad (2)$$

и уравнением состояния

$$\rho = \frac{pM}{RT}, \quad (3)$$

где M – молярная масса газа, г/моль; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура, К.

Поскольку прямое численное моделирование при решении уравнений (1)–(3) требует существенных временных ресурсов при расчете турбулентных течений, то воспользовались стандартной моделью турбулентности k - ε . Здесь уравнение Навье – Стокса преобразуется к виду, в котором добавлено влияние флуктуации средней скорости (в виде турбулентной кинетической энергии) и процесса уменьшения этой флуктуации за счет вязкости (диссипации) [5].

В принятой модели тензор вязких сдвиговых напряжений определяется как

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (4)$$

где μ – динамическая вязкость, Па · с; u – скорость, м/с; x – координата, м; δ_{ij} – дельта-функция Кронекера; k – кинетическая энергия турбулентности.

Динамическая вязкость μ рассчитывается как сумма коэффициентов динамической вязкости μ_l и турбулентной вязкости μ_t .

Коэффициент турбулентной вязкости вычисляется по зависимости

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}, \quad (5)$$

где f_μ , C_μ – коэффициенты; ε – диссипация энергии турбулентности.

Коэффициент C_μ рекомендуется принимать равным 0,9 [6]. Коэффициент f_μ находится по формуле

$$f_\mu = \left(1 - e^{-0,025 R_y} \right)^2 \left(1 + \frac{20,5}{R_\tau} \right), \quad (6)$$

где R_y, R_T – переменные, определяемые по выражениям

$$R_y = \frac{\rho\sqrt{k}y}{\mu_l}, \quad R_T = \frac{\rho k^2}{\mu_l \varepsilon}, \quad (7)$$

где y – расстояние от локального усредненного объема течения до стенки расчетной области, м.

Кинетическая энергия турбулентности k и диссипация этой энергии ε находятся при решении двух уравнений:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k k) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left(\mu_l + \frac{\mu_l}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + S_k, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left(\mu_l + \frac{\mu_l}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right) + S_\varepsilon, \quad (9)$$

где S_k, S_ε – характеристики пульсаций кинетической энергии и диссипации этой энергии, вычисляемые по выражениям

$$S_k = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon - \mu_l \left(\frac{g_i \partial \rho}{\sigma_B \rho \partial x_i} \right), \quad (10)$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_l C_B \left(\frac{g_i \partial \rho}{\sigma_B \rho \partial x_i} \right) \right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}, \quad (11)$$

где $C_{\varepsilon 1} = 1,44, C_{\varepsilon 2} = 1,92, \sigma_\varepsilon = 1,3, \sigma_k = 1$ – эмпирические коэффициенты; f_1, f_2 – переменные, зависящие от коэффициентов динамической и турбулентной вязкости, определяемые по следующим формулам:

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0,05}{f_\mu} \right)^3, \quad f_2 = 1 - e^{-R_T^2}. \quad (12)$$

Использование вышеприведенных уравнений позволило смоделировать течение воздуха в классификаторе, получить распределение скоростей и проанализировать механизм обтекания воздухом вращающегося вала с дисками и пересыпных конусов. Одна из характерных картин течения воздуха представлена на рис. 1.

Моделирование показало, что в классификаторе присутствуют устойчивые контуры циркуляции потока над вращающимися дисками и пересыпными элементами. Воздух движется зигзагообразно, следовательно, происходит многократная поперечно-поточная классификация.

Статистическая обработка профилей полного давления при различных расходах воздуха позволила получить график гидравлического сопротивления классификатора и рассчитать коэффициент сопротивления $\zeta = 290$ (рис. 2).

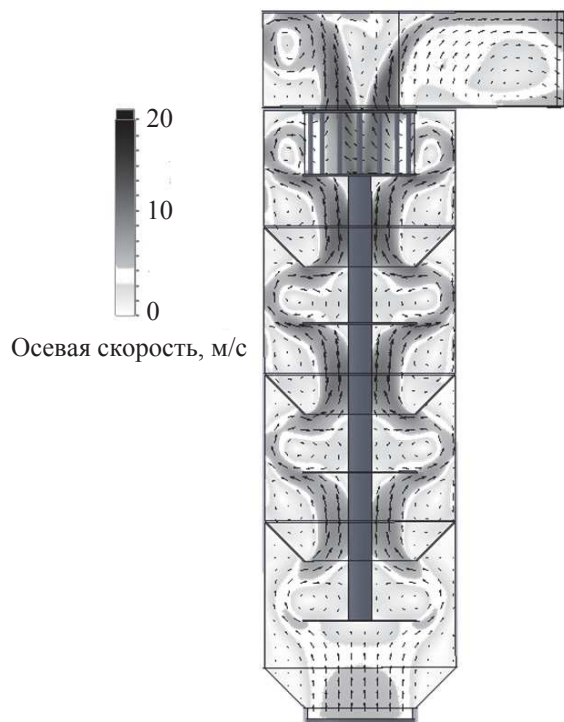


Рис. 1. Профиль осевых скоростей в классификаторе при средней скорости на сечение 2 м/с

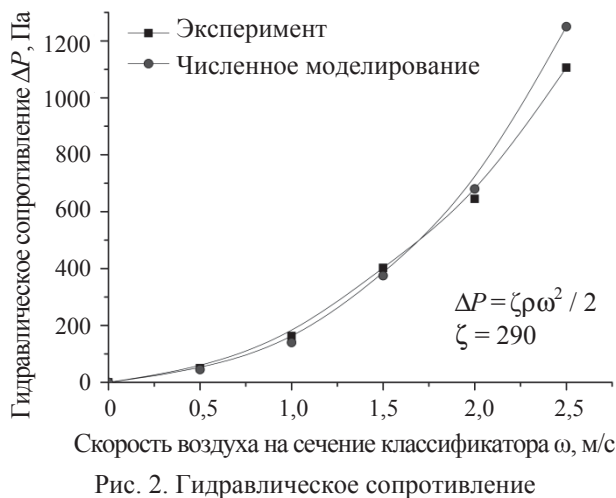


Рис. 2. Гидравлическое сопротивление

Результаты моделирования имеют высокую сходимость с экспериментом. Однако с увеличением скорости наблюдается растущее расхождение. Это объясняется недостатком модели турбулентности k - ε , которая некорректно рассчитывает потоки с большой анизотропностью турбулентности.

Также было установлено, что изменение частоты вращения сепарирующего колеса в пределах от 200 до 1500 об/мин на гидравлическое сопротивление классификатора существенного влияния не оказывает.

Для оценки процесса классификации формулы (1)–(12) были дополнены уравнением движения твердых частиц в потоке [7]:

$$\frac{du_p}{dt} = C_D A \frac{(u - u_p)^2 \rho}{2} + g \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} + F_x, \quad (13)$$

где u_p – скорость частицы, м/с; C_D – коэффициент сопротивления; A – миделево сечение частицы, м²; ρ_p – плотность частицы, кг/м³; F_x – силы, обусловленные полем давлений на поверхности частицы, Н.

Коэффициент сопротивления определялся по формуле Хендерсона [8]:

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{4,12}{1 + 0,03Re + 0,48\sqrt{Re}} + 0,38, \quad (14)$$

где Re – число Рейнольдса при обтекании частицы.

Взаимодействие частиц с элементами классификатора и друг с другом учитывалось как упругий удар. Коэффициент восстановления при моделировании классификации кварцевого песка был принят равным 0,5.

Граничный размер разделения при моделировании определялся следующим образом. В расчетный объем через загрузочный патрубок вводился материал с частицами различного размера. На выходах из классификатора фиксировались размер и количество проходящих через контрольное сечение частиц. Если количество частиц в мелком и крупном классе совпадало, то их размер являлся граничным для текущих параметров классификации. На рис. 3 представлены результаты расчета граничного размера в сопоставлении с экспериментальными данными при классификации песка.

Из графиков (рис. 3) видно, что результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными с небольшой, не превышающей 5–10% погрешностью, особенно при небольших скоростях воздуха в классификаторе. Увеличение скорости воздуха приводит к росту погрешности моделирования. Как уже отмечалось выше, это связано с ограниченными возможностями применяемой модели турбулентности. Но так как исследуемый классификатор

работает в основном при средних скоростях воздуха 1–3 м/с, то данный недостаток не имеет серьезного значения и можно признать результаты моделирования удовлетворительными.

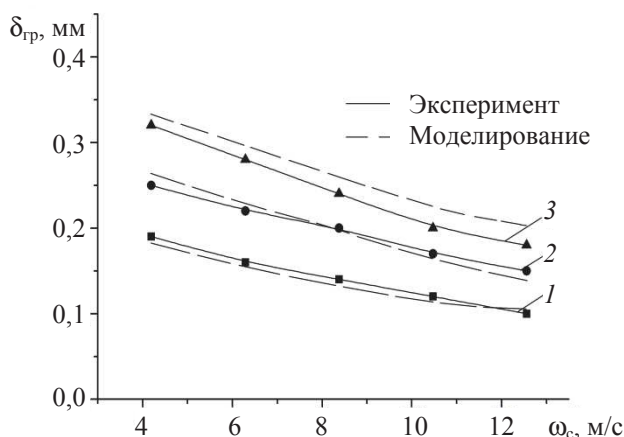


Рис. 3. Зависимость граничного размера разделения $\delta_{гр}$ от линейной скорости стержней ω_c колеса при средней скорости воздуха: 1 – 0,8 м/с; 2 – 1,6 м/с; 3 – 2,2 м/с

Заключение. В результате проведенных исследований смоделировано движение воздушного потока с полидисперсными твердыми частицами в классификаторе. Установлен и изучен поперечно-поточный характер движения воздуха и твердых частиц в аппарате. Изучено влияние на сопротивление классификатора средней по отношению к поперечному сечению скорости воздуха и частоты вращения сепарирующего колеса, при аппроксимации полученных зависимостей квадратной параболой получено значение коэффициента сопротивления. Рассчитан граничный размер разделения частиц при моделировании классификации кварцевого песка и сопоставлен с результатами экспериментальных исследований. Установлена удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных значений. Разработанную модель можно использовать для расчета процесса классификации сыпучих материалов.

Литература

1. Классификатор: пат. 14620 Респ. Беларусь, МПК7 В 07В 4/00 / С. В. Ярмолик, А. Э. Левданский, Д. И. Чиркун, Э. И. Левданский, Е. В. Опимах; заявитель С. В. Ярмолик. № а 20090857; заявл. 11.06.2009; опубл. 28.02.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2011. № 1. С. 67.
2. Влияние отбойно-вихревой ступени разделения на эффективность гравитационного классификатора / Д. И. Чиркун [и др.] // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорг. в-в. 2009. Вып. XVII. С. 179–181.
3. Барский М. Д., Ревнивцев В. И., Соколкин Ю. В. Гравитационная классификация зернистых материалов. М.: Недра, 1974. 232 с.
4. Мизонов В. Е., Ушаков С. Г. Аэродинамическая классификация порошков. М.: Химия, 1989. 158 с.
5. Авраменко М. И. О k - ϵ модели турбулентности. Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2005. 76 с.

6. Алямовский А. А. *Solid Works 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике*. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.
7. White F. M. *Fluid Mechanics*. New York: McGraw-Hill, 1994. 560 p.
8. Henderson C. B. Drag Coefficients of Spheres in Continuum and Rarefied Flows // *AIAA Journal*. 1976. Vol. 14, no. 6. P. 103–112.

References

1. Yarmolik S. V., Levdanskiy A. E., Chirkun D. I., Levdanskiy E. I., Opimakh E. V. *Klassifikator* [Classifier]. Patent BY, no. 14620, 2011.
2. Chirkun D. I., Levdanskiy A. E., Yarmolik S. V., Levdanskiy E. I. Influence of the vortex-vortex separation stage on the effectiveness of the gravitational classifier. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series III, Chemistry and technology of inorganic substances, 2009, issue XVII, pp. 179–181 (In Russian).
3. Barskiy M. D., Revnivitsev V. I., Sokolkin Yu. V. *Gravitatsionnaya klassifikatsiya zernistykh materialov* [Gravitation classification of granular materials]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 232 p.
4. Mizonov V. E., Ushakov S. G. *Aerodinamicheskaya klassifikatsiya poroshkov* [Aerodynamic classification of powders]. Moscow, Khimiya Publ., 1989. 158 p.
5. Avramenko M. I. *O k-ε modeli turbulentsi* [On the k-ε model of turbulence]. Snezhinsk, Izdatel'stvo RFYaTs – VNIITF Publ., 2005. 76 p.
6. Alyamovskiy A. A. *Solid Works 2007/2008. Komp'yuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike* [Solid Works 2007/2008. Computer modeling in engineering practice]. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2008. 1040 p.
7. White F. M. *Fluid Mechanics*. New York, McGraw-Hill, 1994. 560 p.
8. Henderson C. B. Drag Coefficients of Spheres in Continuum and Rarefied Flows. *AIAA Journal*, 1976, vol. 14, no. 6, pp. 103–112.

Информация об авторах

Чиркун Дмитрий Иванович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: chirkund@belstu.by

Саевич Николай Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: saevichm@belstu.by

Левданский Александр Эдуардович – доктор технических наук, доцент кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: alex_levdansky@belstu.by

Ярмолик Сергей Васильевич – ассистент кафедры механики материалов и конструкций. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: yarmolik@belstu.by

Information about the authors

Chirkun Dmitriy Ivanovich – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Processes and Apparatus for Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chirkund@belstu.by

Saevich Nikolay Petrovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Processes and Apparatus for Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: saevichm@belstu.by

Levdanskiy Aleksandr Eduardovich – DSc (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Processes and Apparatus for Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alex_levdansky@belstu.by

Yarmolik Sergey Vasil'yevich – assistant lecturer, the Department of Material and Construction Mechanics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yarmolik@belstu.by

Поступила 02.05.2017