

УДК 621.928; 532.517

**В. С. Францкевич, А. М. Волк**

Белорусский государственный технологический университет

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЧНОГО РАЗМЕРА РАЗДЕЛЕНИЯ  
В ВОЗДУШНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ КЛАССИФИКАТОРАХ**

Процессы разделения многофазных систем выступают составной частью многих технологических процессов в химической, пищевой, нефтехимической, микробиологической, энергетической и других отраслях промышленности. Характер движения частиц в сплошной среде является определяющим при сепарации, разделении фаз, тепломассопереносе и других процессах. Важным моментом для исследования движения частицы в потоке и особенно вблизи ограничивающей поверхности считается учет всех действующих на твердую частицу сил. Сравнительная оценка сил необходима и для исследования процесса фракционирования полидисперсного материала в воздушных динамических классификаторах. Анализ сил позволяет рассчитывать траекторию твердых частиц в газовых потоках.

В данной работе исследована гидродинамика закрученного газового потока в классификаторе, рассмотрены действующие на твердую сферическую частицу силы. Составлена математическая модель процесса сепарации полидисперсных материалов, позволяющая определять граничный размер разделения в динамических классификаторах с учетом изменения как их конструктивных, так и технологических параметров. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании воздушных динамических классификаторов.

**Ключевые слова:** воздушные динамические классификаторы, фракционирование, закрученный поток, твердая частица, силы, математическая модель, траектория движения, граничный размер.

**V. S. Frantskevich, A. M. Volk**

Belarusian State Technological University

**DETERMINATION OF BOUNDARY DIVISION SIZE  
IN AIR DYNAMIC CLASSIFIERS**

The processes of separation of multiphase systems are an integral part of many technological processes in the chemical, food, petrochemical, microbiological, energy and other industries. The nature of the movement of particles in a continuous medium is decisive in the separation, phase separation, heat and mass transfer, and other processes. The consideration of all forces acting on a solid particle is considered to be an important point for studying the motion of a particle in a flow, and especially near the limiting surface. Comparative evaluation of forces is also needed to study the process of fractionation of polydisperse material in air dynamic classifiers. Analysis of the forces makes it possible to calculate the trajectory of solid particles in gas flows.

In this paper, the hydrodynamics of a swirling gas flow in the classifier is investigated, and the forces acting on a solid spherical particle are considered. A mathematical model of the process of separation of polydisperse materials has been compiled, which makes it possible to determine the boundary size of separation in dynamic classifiers taking into account changes in both their design and technological parameters. The results obtained can be used in the design of air dynamic classifiers.

**Key words:** air dynamic classifiers, fractionation, swirling flow, solid particle, forces, mathematical model, motion path, boundary size.

**Введение.** Ежегодно во многих отраслях промышленности Республики Беларусь, в том числе и в химической, механической переработке подвергаются миллионы тонн сыпучих материалов. После их измельчения, как основной стадии переработки, в конечном продукте содержатся частицы, не всегда удовлетворяющие требованиям эффективного протекания последующих технологических процессов. Измельчение же частиц сверх требуемой степени приводит к резкому возрастанию затрат энергии. Поэтому практически во всех технологических линиях по производству полидисперсных материалов,

прежде всего в системах измельчения, устанавливают специальные аппараты (классификаторы), назначение которых состоит в разделении исходного материала в простейшем случае на две фракции с преимущественным содержанием мелких и крупных частиц.

На кафедре машин и аппаратов химических и силикатных производств БГТУ постоянно ведутся работы в области совершенствования оборудования и процесса разделения полидисперсных материалов [1–3]. Несмотря на удовлетворительные результаты, с точки зрения эффективности процесса разделения существу-

ет ряд нерешенных вопросов при исследовании воздушной классификации измельченного материала на фракции. Увеличение эффективности разделения приводит или к усложнению конструкции классификаторов, или к повышению удельных энергозатрат при эксплуатации. Однако чтобы быть конкурентоспособными на мировом рынке производственного оборудования, важно добиваться высокой эффективности работы классифицирующих установок без усложнения их конструкций. Поэтому следует концентрировать усилия, в первую очередь, на оптимизации непосредственно процесса классификации путем его математического моделирования.

Использование результатов математического моделирования, экспериментальных исследований и масштабного перехода на основе теории подобия совершенно необходимо при разработке новых технических решений. Для достижения уровня зарубежных фирм в изучении и изготовлении классифицирующих установок следует также использовать компьютерные приложения, позволяющие ускорить процесс разработки импортозамещающего оборудования, путем проведения теоретических исследований, которые довольно сложно реализовать на практике.

Существующие методики расчета в ряде случаев позволяют достаточно точно определить граничный размер разделения классификатора, однако не в состоянии учесть влияние изменения конструктивных и режимных параметров на эффективность процесса и вид кривой разделения. Для известных типов классификаторов показатели эффективности разделения принимаются на основании эксплуатационных данных. Для новых типов или новых условий работы такие данные могут быть получены только в результате специальных экспериментальных исследований [4].

До недавнего времени изучение поведения газожидкостных систем было ограничено экспериментальными методами, но в связи с быстрым ростом производительности компьютерных систем стало возможным анализировать и рассчитывать подобные процессы даже на персональных компьютерах. Поэтому целью работы было создание универсальной математической модели процесса классификации полидисперсных материалов, позволяющей определять граничный размер разделения в динамических классификаторах с учетом изменения как их конструктивных (соотношение геометрических размеров вращающейся корзины и корпуса, расстояние между лопатками), так и технологических параметров (частота вращения корзины, скорость воздушного потока, гранулометрический состав материала).

Процессы разделения многофазных систем – составная часть многих технологических процессов в химической, пищевой, нефтехимической, микробиологической, энергетической и других отраслях промышленности. Это отделение кристаллов солей от раствора, гранул полимеров от жидкой фазы, обезвоживание мелких фракций твердых материалов, улавливание жидких фракций в газожидкостных потоках, классификация материалов и т. д. Характер движения частиц в сплошной среде является определяющим при сепарации, разделении фаз, массообмене и других процессах [5–12]. При исследовании данных процессов необходим учет всех действующих на твердую частицу сил.

**Основная часть.** Объектом исследования является динамический воздушный классификатор (рис. 1), представляющий собой цилиндрический корпус, внутри которого установлен ротор с отбойными лопатками. При вращении ротора с определенной скоростью более крупные частицы не успевают попасть во внутреннюю его часть и отбиваются лопатками к стенке классификатора, т. е. отделяются от готового продукта. Вращающийся ротор также создает дополнительное вращение несущей среды, что позволяет увеличить центробежную силу, действующую на частицы материала.

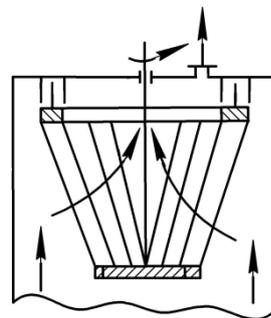


Рис. 1. Динамический воздушный классификатор

Движение частиц в закрученном потоке широко изучалось в циклонных процессах, вихревых массообменных аппаратах, вихревых и центробежных мельницах [13, 14]. Нами также ранее проводились теоретические исследования движения частиц в закрученном газовом потоке в сепарационном пространстве среднеходных мельниц, работающих в комплексе с воздушными классификаторами [15].

Как известно, при попадании частицы материала в закрученный газовый поток на нее воздействует комплекс внешних сил. Определяющими силами, влияющими на движение частиц в газовой среде, являются сила аэродинамического воздействия воздуха и сила тяжести (рис. 2).

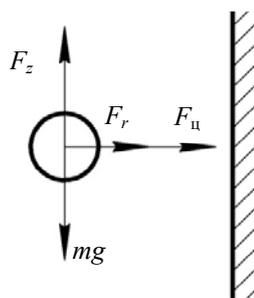


Рис. 2. Схема действующих на частицу сил

Принимаем, что частицы имеют сферическую форму. Скорость частицы обозначим через  $v$ , а скорость газового потока – через  $W$ . Гидродинамика установившегося движения закрученного газового потока внутри цилиндра описывается уравнениями Навье – Стокса и неразрывности в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$ . Профиль осевой составляющей скорости считаем постоянным по длине цилиндра.

Движение закрученного газового потока носит сложный пространственный характер. Твердые частицы, попавшие в такой поток, увлекаются газом и начинают двигаться по спиралеобразным траекториям. Движение по таким траекториям обычно рассматривается в цилиндрической системе координат. Центр системы координат совместим с осью вращения ротора классификатора. Текущими координатами в данном случае будут  $r, \varphi, z$ . Полная скорость движения частиц при этом будет характеризоваться тремя составляющими:  $v_r, v_\varphi, v_z$ .

Тогда в проекциях на оси цилиндрической системы координат уравнения движения твердой частицы в закрученном потоке примут вид

$$\begin{cases} m_a \left( \frac{dv_r}{dt} - \frac{v_\varphi^2}{r} \right) = F_r, \\ m_a \left( \frac{dv_\varphi}{dt} + 2 \frac{v_\varphi v_r}{r} \right) = F_\varphi, \\ m_a \frac{dv_z}{dt} = -m_a g + F_z + F_A. \end{cases} \quad (1)$$

Осевая составляющая закрученного газового потока зависит от заданного расхода  $Q$ ,  $m^3/c$ :

$$W_z = \frac{4Q}{\pi D^2}. \quad (2)$$

Радиальная составляющая скорости газового потока зависит от высоты сепарационной камеры  $H$  и может быть рассчитана по формуле

$$W_r = \frac{Q}{2\pi r H}. \quad (3)$$

Касательная составляющая скорости в корзине зависит от ее угловой скорости вращения:

$$W_\varphi = \omega r = 2\pi n r. \quad (4)$$

Опишем силы, входящие в уравнение движения [3–10].

1. Сила воздействия внешних силовых полей – сила тяжести:

$$\bar{F}_g = m_a g = \rho_a V_a \bar{g}. \quad (5)$$

2. Силы, обусловленные неравномерным распределением давления по поверхности частицы при ее движении в сплошном потоке – сила Архимеда:

$$\bar{F}_A = \rho_r V_a \bar{g}. \quad (6)$$

3. Сила гидродинамического воздействия  $\bar{F} = F_r \bar{e}_r + F_\varphi \bar{e}_\varphi + F_z \bar{e}_z$  потока, движущегося с некоторой скоростью относительно частицы, будет:

$$\bar{F} = \zeta \cdot \frac{1}{2} \rho_r |\bar{W} - \bar{v}| (\bar{W} - \bar{v}) \pi a^2. \quad (7)$$

Модуль разности скоростей воздушного потока и частицы (относительная скорость) можно представить в виде

$$|\bar{W}_i - \bar{v}| = \sqrt{(W_r - v_r)^2 + (W_\varphi - v_\varphi)^2 + (W_z - v_z)^2}. \quad (8)$$

Коэффициент сопротивления  $\zeta$  зависит от режима движения частицы и определяется числом Рейнольдса:

$$\text{Re}_a = |\bar{W} - \bar{v}| \frac{2a}{\nu}. \quad (9)$$

Для нахождения коэффициента сопротивления применяется следующая зависимость [10], которую можно использовать в широком диапазоне изменения критерия Рейнольдса  $\text{Re}$ :

$$\zeta = \frac{24 \cdot (1 + 0,17 \text{Re}_a^{2/3})}{\text{Re}_a}. \quad (10)$$

Полученный анализ сил позволил рассчитать траекторию движения твердых частиц в газовых потоках. Программа расчета составлена в системе MathCad. При заданной частоте вращения ротора классификатора определялся размер частиц, попадающих внутрь вращающейся корзины, т. е. отделившихся в готовый продукт.

Апробация полученной математической модели проводилась на примере расчета граничного размера разделения в типовом воздушном динамическом классификаторе, выпускаемым отечественным производителем классифицирующей техники. Были приняты следующие геометрические параметры классификатора: диаметр корзины – 650 мм; высота корзины –

650 мм; диаметр корпуса классификатора – 1100 мм. Расход газа рассчитывался из условия пневматической транспортировки частиц кварцевого песка и полимерной крошки с максимальным размером 5 мм. Аналитически определялась необходимая частота вращения ротора классификатора для достижения граничных размеров продукта в пределах от 100 до 10 мкм. Полученные данные представлены в виде графической зависимости  $n = f(a)$  (рис. 3). Сравнение расчетных значений показало, что расхождение экспериментальных данных, предоставленных заводом-изготовителем, с расчетными не превышает 10–15%.

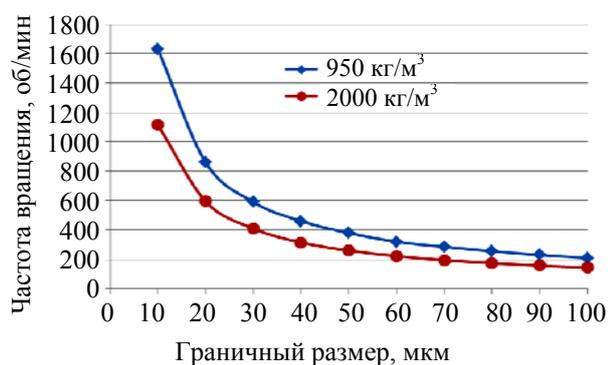


Рис. 3. Изменение граничного размера разделения от частоты вращения ротора

**Заключение.** Таким образом, разработана математическая модель процесса классификации полидисперсных материалов и составлена программа расчета, позволяющая определить необходимую частоту вращения ротора динамического воздушного классификатора для достижения требуемого граничного размера разделения, учитывающая важнейшие конструктивные и технологические параметры классифицирующего агрегата.

**Обозначения.**  $a$  – диаметр частицы, м;  $D$  – внутренний диаметр корпуса классификатора, м;  $\vec{e}$  – единичный вектор;  $F_A$  – сила Архимеда, Н;  $F_g$  – сила тяжести, Н;  $F_\varphi, F_r, F_z$  – составляющие силы аэродинамического воздействия, Н;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $m_a$  – масса частицы, кг;  $Re$  – число Рейнольдса;  $v_\varphi, v_z, v_r$  – тангенциальная, осевая и радиальная составляющие скорости движущейся частицы соответственно, м/с;  $V_a$  – объем частицы, м<sup>3</sup>;  $W_\varphi, W_z, W_r$  – тангенциальная, осевая и радиальная составляющие скорости газового потока соответственно, м/с;  $\bar{W}_z$  – средняя скорость газа, жидкости, м/с;  $\zeta$  – коэффициент сопротивления;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $\rho_r$  – плотность газового потока, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_a$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $\varphi, r, z$  – оси цилиндрической системы координат.

### Литература

1. Дорогокупец А. С., Вайтехович П. Е., Францкевич В. С. Влияние технологических параметров динамического классификатора на аэродинамику и эффективность классификации измельченного продукта в среднеходной мельнице // Вестник ПГУ. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. 2013. № 11. С. 44–51.
2. Францкевич В. С., Дорогокупец А. С. Исследование аэродинамики сепарационной зоны вертикальной валковой мельницы // Строительная наука и техника. 2009. № 4. С. 72–75.
3. Дорогокупец А. С., Францкевич В. С. Влияние технологических параметров динамического сепаратора среднеходной мельницы на энергозатраты // Труды БГТУ. 2014. № 3: Химия и технология неорган. в-в. С. 105–109.
4. Андреев А. А. Разделение угольной пыли в динамическом сепараторе с предвключенным направляющим аппаратом: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14. Иваново, 2006. 124 л.
5. Волк А. М., Терешко Е. В. Анализ сил, действующих на твердую частицу в сплошном потоке // Труды БГТУ. 2015. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 10–14.
6. Нигматуллин Р. И. Динамика многофазных сред: в 2 ч. М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.; Ч. 2. 360 с.
7. Кутепов А. М., Латкин А. С. Вихревые процессы для модификации дисперсных систем. М.: Наука, 1992. 250 с.
8. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1988. 588 с.
9. Щукин В. К., Халатов А. А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. М.: Машиностроение, 1982. 199 с.
10. Медников Е. М. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1981. 176 с.
11. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. М.: Мир, 1975. 378 с.
12. Пирумов А. Н. Аэродинамические основы инерционной сепарации. М.: Госстройиздат, 1961. 124 с.
13. Иванов О. Р., Зарудный Л. Б., Шорин С. Н. О движении мелких частиц в вертикальных циклонных реакторах // Теорет. основы хим. технологии. 1968. Т. 2, № 4. С. 605–608.
14. Вайтехович П. Е. Разработка и исследование вихревых массообменных аппаратов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.08.1982 / Белорус. технол. ин-т. Минск, 1982. 18 с.
15. Францкевич В. С. Моделирование движения частицы материала в кольцевом зазоре валковой среднеходной мельницы // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2004. № 4. С. 39–43.

### References

1. Dorogokupets A. S., Vaytekhovich P. E., Frantskevich V. S. Influence of technological parameters of a dynamic classifier on aerodynamics and efficiency of classification of a crushed product in a medium-flow mill. *Vestnik PGU. Ser. B, Promyshlennost'. Prikladnyye nauki* [Bulletin of the PSU], series B, Industry. Applied Science, 2013, no. 11, pp. 44–51 (In Russian).
2. Frantskevich V. S., Dorogokupets A. S. Investigation of the aerodynamics of the separation zone of a vertical roller mill. *Stroitel'naya nauka i tekhnika* [Building Science and Engineering], 2009, no. 4, pp. 72–75 (In Russian).
3. Dorogokupets A. S., Frantskevich V. S. The influence of technological parameters of the dynamic separator of a bowl roller mill on energy costs. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 3: Chemistry and Technology of Inorganic Substances, pp. 105–109 (In Russian).
4. Andreev A. A. *Razdeleniye ugol'noy pyli v dinamicheskom separatore s predvkluyuchennym napravlyayushchim apparatom. Dis. kand. tekhn. nauk* [Separation of coal dust in a dynamic separator with upstream guide vanes. Cand. Dis.]. Ivanovo, 2006. 124 p.
5. Volk A. M., Tereshko E. V. Analysis of the forces acting on a solid particle in a continuous flow. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 6: Physical-mathematical sciences and informatics, pp. 10–14 (In Russian).
6. Nigmatullin R. I. *Dinamika mnogofaznykh sred: v 2 ch.* [Dynamics of multiphase media: in 2 parts]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Part 1, 464 p. Part 2, 360 p.
7. Kutepov A. M., Latkin A. S. *Vikhrevyye protsessy dlya modifikatsii dispersnykh system* [Vortex processes for the modification of disperse systems]. Moscow, Nauka Publ., 1992. 250 p.
8. Gupta A., Lilli D., Sayred N. *Zakruchennyye potoki* [Swirling flows]. Moscow, Mir Publ., 1988. 588 p.
9. Shchukin V. K., Khalatov A. A. *Teploobmen, massoobmen i gidrodinamika zakruchennykh potokov v osesimmetrichnykh kanalakh* [Heat transfer, mass transfer and hydrodynamics in swirling currents in axisymmetric channels]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1982. 199 p.
10. Mednikov E. M. *Turbulentnyy perenos i osazhdeniye aerorozley* [Turbulent transport and deposition of aerosols]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 176 p.
11. Busroyd R. *Techeniye gaza so vzheshennymi chastitsami* [Gas flow with suspended particles]. Moscow, Mir Publ., 1975. 378 p.
12. Pirumov A. N. *Aerodinamicheskiye osnovy inertsiionnoy separatsii* [Aerodynamic bases of inertial separation]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1961. 124 p.
13. Ivanov O. R., Zarudnyy L. B., Shorin S. N. On the motion of small particles in vertical cyclone reactors. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 1968, vol. 2, no. 4, pp. 605–608 (In Russian).
14. Vaytekhovich P. E. *Razrabotka i issledovaniye vikhrevykh massoobmennyykh apparatov. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Development and research of vortex mass transfer apparatus. Abstract of thesis cand. of tech. sci.]. Minsk, 1982. 18 p.
15. Frantskevich V. S. Simulation of the movement of a particle of material in the annular gap of a roll medium-speed mill. *Vesti Natsiyanal'nay akademii navuk Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. navuk* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus], Series of physical and technical sciences, 2004, no. 4, pp. 39–43 (In Russian).

### Информация об авторах

**Францкевич Виталий Станиславович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: fvs2@tut.by

**Волк Анатолий Матвеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: volk@belstu.by

### Information about the authors

**Frantskevich Vitali Stanislavovich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fvs2@tut.by

**Volk Anatoliy Matveevich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Higher Mathematics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volk@belstu.by

Поступила 08.11.2018