

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ ПО ПОВЕРХНОСТИ РОТОРА КЛАССИФИКАТОРА

М.А. Киркор, Р.А. Бондарев, В.И. Никулин

Проведен силовой анализ частицы продукта, движущейся по поверхности ротора классификатора. Рассмотрена кинематика движения двухфазного воздушного потока в межлопаточном канале ротора. Получена аналитическая зависимость граничного размера разделения от параметров проведения процесса для классификатора с криволинейными лопатками.

Введение

Граничный размер разделяемых частиц является одной из основных характеристик работы оборудования для классификации полидисперсных порошков. Множество технологий производства требует получения продукта различных размеров, от крупных (порядка 10 мм) до сверхмалых (5 мкм) [1]. С развитием пищевой промышленности можно наблюдать тенденцию к снижению размера частиц сырья и полуфабрикатов, используемых в современных технологиях производства. Это обстоятельство в свою очередь стимулирует развитие множества направлений совершенствования оборудования для сортировки материала по размеру. Известно, что для большинства классификаторов работа со сверхмалыми размерами частиц весьма затруднительна из-за того, что при размерах частиц менее 50 мкм движущие силы процесса разделения уступают адгезионным силам [2]. Явление адгезии усугубляется тем фактом, что для промышленных аэродинамических классификаторов характер движения несущей среды представляет собой ярко выраженный турбулентный поток. Локальные турбулизации, вихри, возмущения способствуют повышенному контакту частиц продукта, которые в свою очередь соединяются в агрегаты и отделяются совместно с грубым продуктом.

Литературный обзор показывает, что одной из перспективных тенденций повышения качества разделения порошков при сверхмалых размерах является использование в качестве рабочего органа ротора с криволинейными лопатками. Экспериментально доказано, что классификатор, снабженный данным ротором, позволяет получать четкую границу разделения порошков в интервалах размеров от 5 до 50 мкм [3]. Несмотря на то, что существующие аналоги не могут обеспечить таких показателей работы, промышленный выпуск данного оборудования ограничен рядом причин. Одной из основных причин является отсутствие расчетных зависимостей для классификаторов данного типа.

Существующие методики расчета центробежных роторных классификаторов не могут быть применимы в силу принципиально отличающихся законов движения частиц. Наиболее близкой методикой расчета параметров центробежного классификатора является методика, представленная в литературе [4], в которой расчет основан на эмпирическом уравнении критериального вида. Данное уравнение довольно точно позволяет производить расчет роторных классификаторов типа РК, однако малоприменима к конструкциям, отличающимся видом ротора, способом подвода и отвода материала, формой корпуса и рядом других особенностей.

В данной работе предполагается изучить характер движения частицы продукта в межлопаточном пространстве ротора, опираясь на силовой анализ и анализ гидродинамики течения воздушного потока в межлопаточном канале ротора.

Конечной целью работы является получение уравнения, позволяющего связать граничный размер разделения продукта с режимными параметрами процесса, свойствами продукта и конструктивными параметрами классификатора. Кроме этого предполагается про-

известии сравнительный анализ различных типов лопаток ротора классификатора и определить их влияние на характер течения несущей среды в канале ротора.

Результаты исследований и их обсуждение

Кинематика воздушного потока на роторе классификатора. Условия движения частиц с воздушным потоком в межлопаточных каналах ротора отличаются крайней сложностью и неопределенностью за счет неустановившегося движения и периодического изменения направления и скалярного значения величины скоростей и сил, приложенных к единичной частице продукта. Также условия движения осложняются взаимодействием множества частиц друг с другом, в результате чего возникают неучтенные факторы как с точки зрения аэродинамики воздушного потока, так и с точки зрения механики взаимодействия твердых частиц. Совместное движение частиц твердой фазы продукта дестабилизирует структуру потока, изменяет условия обтекания частиц и зачастую способствует отрыву потока и местным турбулизациям уже в переходном режиме течения. Кроме этого взаимное воздействие частиц продукта друг на друга вызывает потерю кинетической энергии, возникновение сил сухого трения и электромагнитных сил, которые, в свою очередь, влияют на результирующую силу, приложенную к частице, отклоняя ее тем самым от траектории [5].

Для определения оптимального характера движения было произведено моделирование гидродинамики движения воздушного потока в межлопаточном пространстве ротора с использованием средства САПР SW Flow motion 14, схема гидродинамических течений представлена на рисунке 1.

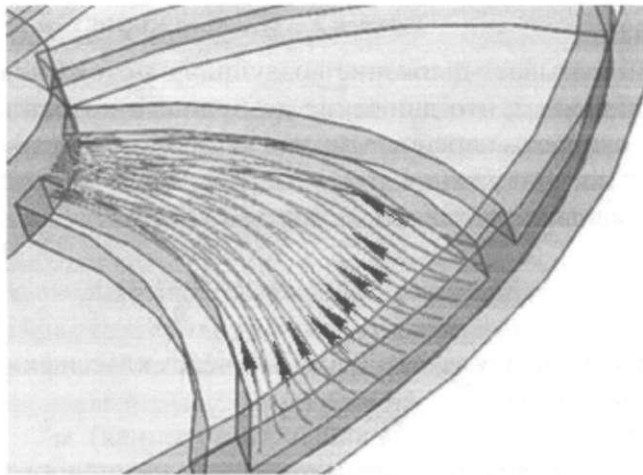


Рисунок 1 – Схема движения воздушного потока в каналах ротора

Анализ показал, что в канале ротора имеет место развитое турбулентное течение воздушного потока во всем диапазоне интервалов варьирования объемного расхода воздуха. Таким образом, структура потока не является однородной по всему поперечному сечению канала. В периферийной области сегмента канала образуется область низкого динамического давления, которая характеризуется более низкой скоростью воздушного потока по сравнению со средней. В то же время со стороны атаки лопатки наблюдается область высокого динамического давления, следовательно, скорость движения воздушного потока выше среднего значения.

Для анализа кинематики движения потока необходимо установить величину и направление скорости в любой точке межлопаточного канала. Графическая интерпретация кинематических параметров выражается схемой скоростей, представленной на рисунке 2 [6].

Абсолютную скорость частицы, v (м/с), твердого продукта, движущегося в воздушном потоке в произвольной точке ее траектории, можно получить векторным сложением ее составляющих, т.е. переносной и относительной скорости (1):

$$\vec{v} = \vec{v}_e + \vec{v}_r, \quad (1)$$

где v_e – переносная скорость движения воздушного потока, м/с; v_r – относительная скорость движения воздушного потока, м/с.

Для расчета принимаем, что единичная частица продукта совместно с воздушным потоком движется от периферии диска к его центру, а траектория движения частицы представляет собой кривую АВ, которая находится на расстоянии Δz от лопатки с углом раскрытия β .

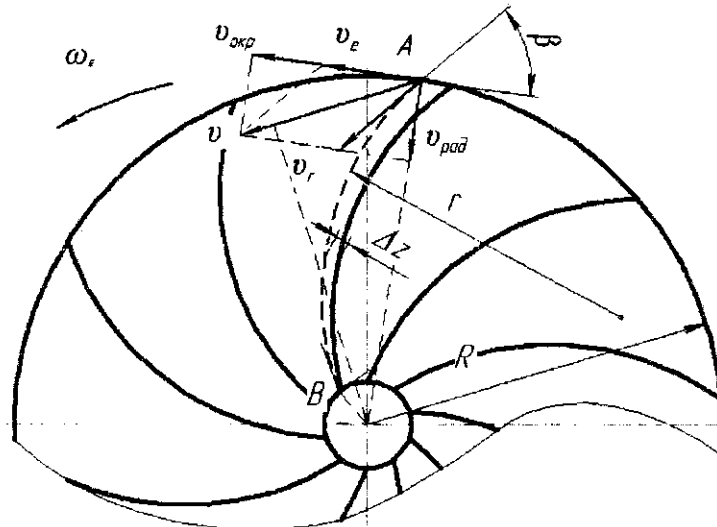


Рисунок 2 – Схема скоростей

Разница давлений вызывает движение воздушного потока и частицы, увлекаемой с ними. Для анализа принимаем, что движение воздушного потока и ротора является установившимся (угловая скорость переносного движения $\omega_e = \text{const}$). Очевидно, что линейная скорость относительного движения будет определяться скоростью воздушного потока, продуваемого через каналы ротора, по выражению (2):

$$v_r = \frac{Q}{S_e n}, \quad (2)$$

где Q – объемный расход воздуха, продуваемый через классификатор, м³/с;

n – число каналов ротора;

S_e – площадь поперечного сечения канала (внутренняя), м².

В свою очередь переносная скорость движения воздушного потока определяется по выражению (3):

$$v_e = \omega_e R, \quad (3)$$

где ω_e – угловая скорость вращения ротора, рад/с;

R – текущий радиус диска, определяется в зависимости от положения частицы, м.

Для характеристик кинематики потока используют также составляющие абсолютной скорости $v_{рад}$ – медианная (радиальная скорость) и $v_{окр}$ – окружная скорость.

Изменение медианной скорости согласуется с условием неразрывности потока в канале ротора, следовательно, данный кинематический параметр характеризует поток, радиально протекающий в канале, который в свою очередь характеризует движение частиц материала в канале ротора.

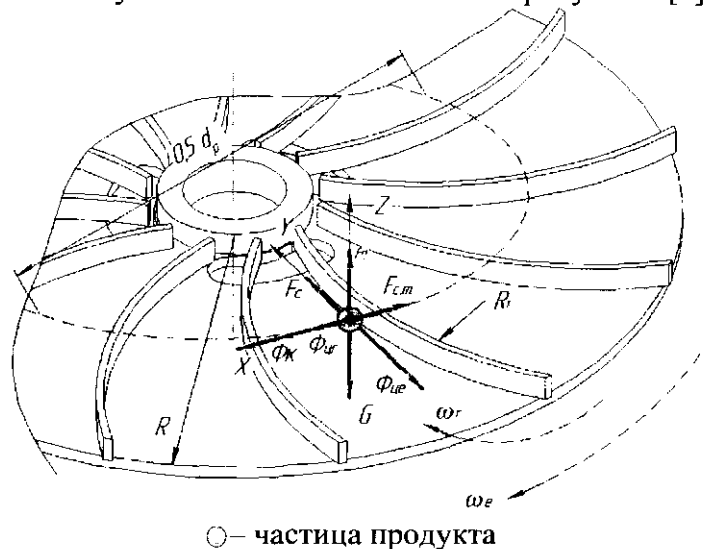
Окружная скорость $v_{окр}$ характеризует появление вихря, который образует вращательное движение на поверхности ротора.

Анализ влияния составляющих абсолютной скорости с точки зрения разделения порошков показывает, что радиальное движение напрямую связано с граничным размером разделения порошков и с производительностью классификатора. В свою очередь окружное движение и вызванное им вихреобразование отрицательно сказывается на процессе

разделения за счет дополнительного увеличения контакта между частицами, возрастающей составляющей адгезии частиц, что приводит к агрегатированной и снижению качественных характеристик процесса.

Учитывая данное обстоятельство, можно проанализировать возможность применения криволинейных лопаток различных типов. Традиционно криволинейные лопатки разделяют на три основные группы: загнутые вперед, оканчивающиеся радиально и загнутые назад [7]. Различие между ними заключается в угле раскрытия лопатки. Так, для лопаток, загнутых вперед угол раскрытия β превышает 90° ; у лопаток, оканчивающихся радиально угол раскрытия β составляет 90° ; а у лопаток, загнутых назад, угол раскрытия β менее 90° . Учитывая тот факт, что угол схода лопатки напрямую влияет на угол ориентации вектора v_r , который в свою очередь влияет на угол ориентации абсолютной скорости, а значит и на соотношение радиальной и окружной скорости, можно прийти к выводу, что наиболее приемлемыми в данном случае являются лопатки, загнутые назад. Применение данного типа лопаток позволит существенно уменьшить вихреобразование в межлопаточном канале ротора по сравнению с другими типами криволинейных и прямолинейных лопаток.

Анализ динамики движения частицы продукта. Для аналитического определения граничного размера частиц центробежного роторного классификатора необходимо знать величину и направление сил, приложенных к частице материала, находящейся в воздушном потоке. Для чего составим схему сил. Схема сил показана на рисунке 3 [8].



○ — частица продукта

Рисунок 3 – Схема сил, приложенных к частице продукта

Представим силы, приложенные к частице в виде векторов. Для удобства расчета принимаем за начало системы координат центр масс частицы продукта. Направляем ось Y по касательной к траектории частицы, т.е. по радиусу диска. Оси X и Z перпендикулярно оси Y . Конструкцией классификатора [3] предусмотрено, что ротор совершает вращательное движение в сторону наименьшего угла атаки криволинейных лопаток (на рисунке 3 по часовой стрелке). Кроме этого воздушный поток с частицами материала движется по каналу, образованному лопатками к центру диска. Предполагается, что продукт размером меньше граничного достигает центра диска и отводится с проходящим воздушным потоком из корпуса классификатора. Частица размера больше граничного движется в направлении, противоположном движению воздушного потока, после чего покидает ротор через специальные каналы и в последующем осаждается в корпусе классификатора.

Частица продукта участвует в сложном движении. Для определения силовых факторов, действующих на частицу, необходимо разложить сложное движение по каналу вращающегося диска на два простых движения. Для всех величин, характеризующих относительное движение, далее принимается индекс «г». За относительное движение принимаем вращательное движение частицы, находящейся в воздушном потоке, который протекает по каналу в межлопаточном пространстве ротора и вызывается силой аэродинамического

сопротивления частицы, а именно ее радиальной F_c и тангенциальной F_{ct} составляющая. Вращательное движение в данном случае обусловлено наличием криволинейных лопаток, радиусом R_1 , следовательно, при наличии вращательного движения возникает сила инерции от центростремительного ускорения $\Phi_{ир}$. Тогда за переносное движение принимается вращательное движение диска ротора относительно неподвижной оси вращения. Далее для всех величин, характеризующих переносное движение, принимается индекс «е». Вращательное движение вызывает силу инерции от центростремительного ускорения $\Phi_{ие}$. Наличие относительного и переносного вращательного движения свидетельствует о наличии ускорения Кориолиса и, как следствие, силы инерции от этого ускорения Φ_k . Вертикальное движение обусловлено силой тяжести частицы G и подъемной аэродинамической силой. Так как масса частицы незначительна, а режим течения воздушного потока турбулентный пренебрегаем движением частицы в вертикальном направлении и считаем скорость его движения равной нулю.

Приняв частицу продукта за материальную точку и спроецировав вектора сил на оси, можно записать дифференциальные уравнения ее движения по ротору (4):

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dv_x}{dt} &= \Phi_k + \Phi_{ир} - F_{c,m} \\ m \frac{dv_y}{dt} &= F_c - \Phi_{ие} \\ 0 &= F_{II} - G \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Полученная система дифференциальных уравнений может быть использована для описания движения частицы продукта.

Аналитическое определение граничного размера разделения. Для определения граничного размера частицы необходимо принять условие, при котором относительная скорость движения частицы равна нулю. Большое значение имеет местоположение частицы на роторе. При этом важно учитывать радиальное, тангенциальное и осевое положение частицы.

Радиальное положение определяется исходя из конструктивных особенностей ротора классификатора. В идеальном случае частица граничного размера прекратит свое относительное движение при координате равной половине диаметра ротора. В данном случае частица не будет относиться ни к зоне отвода тонкой фракции, ни к зоне отвода грубой фракции.

Тангенциальное положение частицы определяется исходя из структуры воздушного потока и характера его течения в межлопаточном пространстве. Нежелательным является нахождение частицы как в области высокого давления, так и в области низкого давления. В первом случае за счет более высокой скорости воздушного потока возможен унос в мелкую фракцию частиц, размер которых превышает граничный. В случае попадания частицы в область низкого давления возможен выброс целевого продукта совместно с грубой фракцией. Таким образом, оптимальным является положение, проходящее через среднюю линию сегмента канала, которая характеризуется средней скоростью движения. Кроме этого средняя линия тока наименее подвержена турбулизациям и завихрениям, которые отрицательно влияют на ход процесса классификации.

Осевое положение частицы обусловлено тем фактом, что частица находится в воздушном потоке, где на нее действует подъемная сила и, учитывая тот факт, что масса частицы мала, допустим, что частица не касается поверхности ротора и занимает положение на расстоянии равном половине высоты канала над поверхностью ротора

Таким образом, будут рассмотрены все силовые факторы, приложенные к частице продукта, находящейся в условии динамического равновесия, при этом не учитывается сила трения частицы продукта об поверхность ротора и его лопатки.

Условием динамического равновесия частицы в радиальном направлении является условие компенсации силы аэродинамического сопротивления силой инерции от переносного центростремительного ускорения (5):

$$|F_c| = |\Phi_{ин}}, \quad (5)$$

где F_c – сила аэродинамического сопротивления, Н;

$\Phi_{ин}$ – сила инерции от переносного центростремительного ускорения, Н.

Сила инерции центростремительного ускорения определяется по формуле (6) [9]:

$$\Phi_{ин} = \frac{m \omega_c^2 \cdot 0,5 \cdot d_p}{2}, \quad (6)$$

где m – масса частицы, кг;

ω_c – угловая скорость вращения ротора, рад/с;

d_p – диаметр ротора, м.

Сила аэродинамического сопротивления определяется по формуле (7) [10]:

$$F_c = \lambda F \cdot 0,5 \cdot v^2 \rho_0, \quad (7)$$

где λ – коэффициент сопротивления частицы;

F – площадь миделевого сечения частицы, m^2 ;

v – скорость движения воздушного потока, м/с;

ρ_0 – плотность среды, kg/m^3 .

Подставим величины силы аэродинамического сопротивления и силы инерции от центростремительного ускорения и выразим массу частицы, получим выражение (8):

$$m = \frac{2 \cdot \lambda F v^2 \rho_0}{\omega_c^2 d_p}. \quad (8)$$

Будем считать, что форма частицы материала будет представлять собой шар. Выразим диаметр частицы исходя из массы (9) [8]:

$$m = \rho_c V_c, \quad (9)$$

где ρ_c – плотность частицы, kg/m^3 ;

V_c – объем частицы, m^3 .

Объем шарообразной частицы определяется по выражению (10) [10]:

$$V_c = \frac{1}{6} \cdot \pi d_c^3, \quad (10)$$

где d_c – диаметр частицы, м.

Площадь поперечного сечения для шарообразной частицы будет определяться по выражению (11) [10]:

$$F = \frac{\pi d_c^2}{4}. \quad (11)$$

Подставим выражения (9),(10) в выражение (8), получим выражение (12):

$$d_c = \frac{6 \cdot v^2 \rho_0}{\rho_c \omega_c^2 d_p}. \quad (12)$$

Объемный расход воздуха, продуваемого через классификатор, связан со скоростью движения воздуха в канале ротора и определяется выражением (13):

$$Q = v S_n z, \quad (13)$$

где Q – объемный расход воздуха, m^3/c ;

S – площадь поперечного сечения канала, m^2 ;

z – число каналов;

Выразим из формулы (13) скорость движения воздушного потока и подставим ее в выражение (12), получим выражение (14):

$$d_q = \frac{6 \cdot Q^2 \rho_0}{\rho_q \omega_e^2 d_r S_g^2 z^2}. \quad (14)$$

Выражение (14) позволяет связать между собой граничный размер разделения классификатора с технологическими, кинематическими, конструктивными параметрами установки, а также со свойствами продукта и несущей среды.

Заключение

В результате произведенных исследований было установлено, что применение в качестве рабочего органа центробежного роторного классификатора ротора с криволинейными лопатками является перспективным решением, которое позволяет повысить эффективность работы при разделении микророшков. Сравнительный анализ различных типов лопаток показал, что наиболее приемлемым является применение лопаток, загнутых назад, так как в этом случае наблюдается наименьшее вихреобразование воздушного потока на поверхности ротора. Уменьшение вихреобразования в свою очередь позволяет получить более стабильное течение воздушного потока, что положительно сказывается на качестве разделения и позволяет разделять частицы сверхмалых размеров. Анализ динамики движения частицы продукта в канале ротора позволил получить уравнение, связывающее граничный размер разделения классификатора с его технологическими, кинематическими, конструктивными параметрами, а также со свойствами разделяемого продукта и несущей среды. Полученное уравнение может быть использовано как начальный этап методики расчета центробежных роторных классификаторов с криволинейными лопатками.

Литература

- 1 Сафонова, Л.А. Применение пищевых добавок в индустрии напитков/ Л.А. Сафонова. – СПб.: Профессия, 2007. – 240 с.
- 2 Барский, М.Д. Фракционирование порошков/ М.Д. Барский. – М.: Недра, 1980. – 327 с.
- 3 Сиваченко Л.А. Новое технологическое оборудование для комплексной переработки пищевого сырья растительного происхождения/ Л.А. Сиваченко [и др.] / Вестник ПГУ. Серия Б. Промышленность. Прикладные науки.– 2014. – № 11. – С. 52–58.
- 4 Мизонов, В.Е. Аэродинамическая классификация порошков/ В.Е. Мизонов, С.Г. Ушаков. – М.: Химия, 1989. – 160 с.
- 5 Киркор, М.А. Гидродинамика течений в межлопаточном пространстве центробежного классификатора / М.А. Киркор, Р.А. Бондарев // Научные достижения молодежи – решению проблем питания человечества в XXI веке: тез. докл. 77 науч. конф. мол. учен., аспирант. и студ., Киев, 11-12 апр. 2011 г. / НУПТ; редкол.: С.В. Иванов [и др.] - Киев, 2011. – в 3-х ч. – Ч.2. – С.101.
- 6 Бондарев, Р.А. Аналитическое исследование кинематики движения воздушного потока в межлопаточном пространстве ротора / Р.А. Бондарев, М.А. Киркор // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. X Междунар. науч.- техн. конф., Могилев, 23-24 апр., 2015 г. / Мог. гос. ун-т прод.; редкол.: А.В. Акулич [и др.]. – Могилев, 2015. – С. 235.
- 8 Бальян, С.В. Теоретическая термодинамика и тепловые двигатели/ С. В. Бальян. – Л.: Машиностроение, 1973. – 304 с.
- 9 Бондарев, Р.А. Определение граничного размера разделения продукта в центробежном роторном классификаторе / Р.А. Бондарев, М.А. Киркор // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. X Междунар. науч.- техн. конф., Могилев, 23-24 апр., 2015 г. / Мог. гос. ун-т прод.; редкол.: А.В. Акулич [и др.]. – Могилев, 2015. – С. 217.
- 9 Яблонский, А.А. Курс теоретической механики. Статика. Кинематика/ А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. – М.: Высшая школа, 1966. – 430 с.
- 10 Волошин, А.И. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов/ А. И. Волошин, Б. В. Понамарев. – Киев: Наукова думка, 2001. – 519 с.

Поступила в редакцию 30.04.2015