

Учреждение образования
«Могилевский государственный университет продовольствия»

УДК 621.928

КИРКОР
Максим Александрович

**ЦЕНТРОБЕЖНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ПИЩЕВЫХ
ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В АППАРАТЕ РОТОРНОГО
ТИПА**

05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

г. Могилев, 2006

Работа выполнена в УО «Могилевский государственный университет
продовольствия».

Научный руководитель доктор технических наук, доцент
Шуляк Виктор Анатольевич
УО «Могилевский государственный
университет продовольствия»,
зав. кафедрой «Прикладная механика»

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Груданов Владимир Яковлевич
УО «Могилевский государственный
университет продовольствия»,
Зав. кафедрой «Машины и аппараты
пищевых производств»

кандидат технических наук, доцент
Вайтехович Петр Евгеньевич
УО «Белорусский государственный
технологический университет»,
зав. кафедрой «Машины и аппараты
химических и силикатных производств»

Оппонирующая организация: РУП «БелНИИ пищевых продуктов»

Защита состоится 1 марта 2006 г. в 13⁰⁰, ауд. 206(2) на заседании
специализированного Совета по защите диссертаций Д 02.17.01 при УО
«Могилевский государственный университет продовольствия» по адресу:
212027, г. Могилев, пр. Шмидта, 3.

Тел. ученого секретаря (375)-(222) 48-35-41. Факс 48-00-11.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

В пищевой промышленности разделение порошкового материала на фракции осуществляется, как правило, ситовым методом, который не позволяет выделить частицы с размерами менее 100 мкм. Однако для применения пищевых добавок данные параметры недопустимы, т.к. предел органолептической чувствительности человека для многих порошковых добавок составляет 8 – 20 мкм. Соответственно для того, чтобы повысить качество пищевых продуктов с использованием добавок, необходимо, чтобы размер частиц порошка был меньше 10 мкм. Также в зависимости от размера частиц в продуктах могут проявляться пороки (мучнистость, песчанность, для пищевых суспензий расслоение – осаждение частиц на стенках и дне), которые проявляются уже при размерах частиц 20 – 50 мкм.

Применение же процесса центробежной классификации в аппаратах роторного типа позволяет выделять из порошка частицы с размерами от 2 до 50 мкм. Применение этого процесса совместно с процессом измельчения позволяет снизить затраты электрической энергии на процесс, повысить производительность мельницы и качество готовых порошков, что ведет к повышению их конкурентоспособности.

До настоящего времени не выполнялись теоретические и экспериментальные исследования процесса центробежной классификации пищевых порошков. Существующие типы аппаратов не отличаются экономичностью и высоким качеством разделения пищевых порошков. Поэтому проведение исследований в данной области и создание новых типов аппаратов позволит выявить основные закономерности процесса разделения пищевых порошков в зависимости от кинематических и расходных параметров процесса, а также свойств пищевых продуктов, что, безусловно, является актуальной научной проблемой.

Исследования в данной области является актуальным вопросом для народного хозяйства нашей страны, т.к. они позволят расширить ассортимент пищевых продуктов, выпускаемых с применением пищевых порошков, повысить их вкусовые характеристики. Это, в свою очередь, позволит наладить выпуск конкурентоспособных отечественных пищевых порошков и сократить импорт зарубежных продуктов.

Связь работы с крупными научными программами, темами

Отдельные части данной работы выполнялись в рамках государственной программы ориентированных фундаментальных исследований «ЭНЕРГИЯ», утвержденной Постановлением Президиума Национальной Академии Наук Беларуси № 94 от 05.07.2001 г., в разделе «Исследование процессов тепло-массопереноса в пищевых дисперсных системах» (№ г.р. 20023409). С 2001 по 2003 гг. по теме «Разработка и исследование высокоэффективных аппаратов для проведения гидромеханических и тепло-массообменных процессов» (№ г.р. 20013260). С 2003 по 2005 гг. по теме «Исследование процессов резания и измельчения пищевых материалов» (№ г. р. 20013263).

Цели и задачи исследования

Целью диссертационной работы является исследование процесса центробежной классификации пищевых полидисперсных материалов и разработка конструкции центробежного классификатора для их разделения.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1. На основе патентной информации определить наиболее перспективное направление развития конструирования центробежных классификаторов и выявить конструктивные признаки, наиболее часто встречающиеся в этих аппаратах.
2. Разработать физическую модель и конструкцию центробежного классификатора с учетом выявленных особенностей.
3. Составить математическую модель гидродинамики потоков воздуха в корпусе аппарата и определить их зависимости от конструктивных параметров классификатора.
4. Исследовать процесс центробежной классификации полидисперсных материалов и вывести уравнения, описывающие зависимости качественных показателей процесса от его кинематических и расходных параметров.
5. На основании исследований разработать методику инженерного расчета центробежных классификаторов нового типа.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования данной диссертационной работы является процесс центробежной классификации пищевых полидисперсных материалов, а предметом исследований являются зависимости качественных параметров процесса от кинематических и расходных характеристик.

Гипотеза

В основу научной гипотезы положено предположение, что управление гидродинамикой пограничных слоев в зоне центробежного разделения позволит достичь более четкой границы разделения и повысит качество процесса классификации. Одним из путей в этом направлении является взаимодействие двух и более взаимно перпендикулярных потоков на границы зоны разделения.

Методология и методы проведенного исследования

При выполнении диссертационной работы использованы надежные методы экспериментальных исследований, такие как, пикнометрический метод, метод оптической микроскопии; численные компьютерные методы решения уравнений; современные статистические методы аппроксимации экспериментальных данных.

Научная новизна и значимость полученных результатов

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Впервые разработана математическая модель влияния конструктивных размеров рабочего органа центробежного классификатора (радиус ротора, радиус ввода потока в ротор, ширина лопаток и их число, угол наклона лопаток) и технологических параметров процесса (расход воздуха, частота

вращения ротора) на величину внутренних циркуляционных течений в корпусе аппарата и эффективность классификации.

2. Получены новые результаты численного анализа затрат энергии на процесс классификации.
3. Определен диапазон оптимальных значений кратности циркуляции (отношение полного расхода воздуха к проточному расходу), при котором значение качественных показателей процесса классификации имеют максимальные значения.
4. Получены новые экспериментальные данные и критериальные уравнения, описывающие зависимости качественных показателей процесса классификации пищевых порошков (КПД классификатора, степень проскока, качество классификации, коэффициент повышения равномерности структуры, критерий Ханкока – Луйкена) от рабочих параметров процесса и конструктивных размеров аппарата.

Практическая (экономическая, социальная) значимость полученных результатов.

1. Создан принципиально новый аппарат для центробежной классификации пищевых порошковых материалов, отвечающий всем требованиям технологии и отличающийся высоким качеством и четкостью разделения по фракциям.
2. Получены тонкодисперсные порошки высокого качества в производственных условиях ОАО «Могилевский желатиновый завод», что дает возможность применять их в качестве пищевой добавки к различным продуктам питания. В свою очередь это позволит расширить ассортимент продуктов, выпускаемых предприятиями пищевой промышленности с использованием функциональной пищевой кальциевой добавки, повысить конкурентоспособность отечественных товаров, снизить импорт зарубежных аналогов.
3. Разработана методика инженерного расчета центробежного классификатора роторного типа, позволяющая конструировать новые типы аппараты для любых предприятий пищевой промышленности в соответствии с их потребностями и свойствами пищевых порошков.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Результаты аналитического исследования конструкций центробежных классификаторов.
2. Результаты теоретических исследований гидродинамики внутренних циркуляционных течений в корпусе аппарата.
3. Результаты численного анализа затрат энергии на процесс классификации.
4. Результаты экспериментальных исследований процесса центробежной классификации полидисперсных пищевых порошков.
5. Методика расчета геометрии и кинематики аппарата, прогнозирования качественных характеристик процесса классификации.

Личный вклад соискателя

Все результаты работы получены соискателем самостоятельно.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались на II, III, IV и V Международных научно-технических конференциях «Техника и технология пищевых производств» (Могилев, 1999 – 2005), на Международной научно-технической конференции «Новые технологии в химической промышленности» (Минск, 2002), международной научно – технической конференции «Современные технологии, материалы, машины и оборудование» (Могилев, 2002), Международной научно – технической конференции «Полимерные композиты и триботехнология (Поликомтриб-2005)» (Гомель, 2005), Международной научно – практической конференции «Перспективы производства продуктов питания нового поколения» (Минск, 2005).

Опубликованность результатов

По результатам диссертационной работы опубликовано 3 статьи в рецензируемых научных журналах, 2 статьи в сборниках научных трудов, 13 тезисов докладов, получен патент РБ. Общее количество страниц опубликованных материалов – 43.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из содержания, перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 116 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приводится анализ совместной работы измельчителя и классификатора, доказана необходимость и экономическая целесообразность такого использования. Приведены некоторые схемы организации процесса предварительной и окончательной классификации. На основе анализа патентных и литературных источников определены приоритетные направления развития аппаратов для разделения полидисперсных материалов.

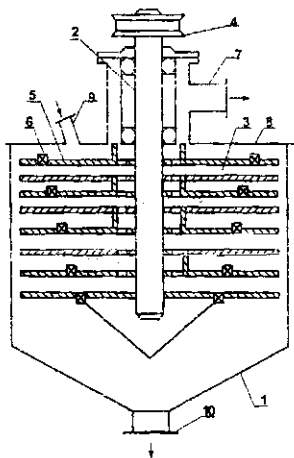


Рис. 1 – Классификатор для разделения порошковых материалов

Выявлено, что преимущественное внимание уделяется разработке центробежных классификаторов роторного типа. Это можно объяснить тем, что у аппаратов данного типа фактор разделения в 5 – 10 раз выше, чем у инерционных классификаторов.

На основании аналитического анализа патентной информации определены основные конструктивные признаки (тип и форма корпуса, количество входных и выходных патрубков, расположение приводного вала и

тип ротора) присущие классификаторам роторного типа, на основании которых сформулированы критерии создания новых типов аппаратов.

С учетом этих критериев был разработан и изготовлен центробежный классификатор для разделения полидисперсных пищевых порошков (рис.1), который включает в себя цилиндрикоконический корпус (1), вертикальный приводной вал (2), лопастной ротор (3), шкив привода (4), патрубок вывода мелкой фракции (7), верхнюю крышку корпуса (8), патрубок ввода исходного продукта (9) и патрубок вывода крупной фракции (10). Лопастной ротор состоит из верхних дисков (5) и окон (6).

Во второй главе рассмотрена гидродинамика однофазных и двухфазных течений в рабочем колесе центробежного классификатора. Движение струек в межлопаточных каналах с позиции прикладной механики можно рассматривать как сложное, то есть состоящее из относительного движения (движение относительно вращающихся элементов колеса) и переносного движения (вращательное движение самого колеса и протекающего по его каналам потока). Эти скорости, а также абсолютная скорость потока v определялись по выражению (1). Причем вектора скорости относительного движения в периферийной (область, расположенная за диаметром заборного окна) и внутренней частях (зона сепарации) межлопаточного канала рабочего органа аппарата направлены в противоположные стороны (рис. 2).

$$g_r = \frac{Q_r}{\pi \cdot D \cdot b \cdot \psi}; \quad g_0 = \omega \cdot R = \omega \cdot \frac{D}{2}; \quad v = \sqrt{g_r^2 + g_0^2} \quad (1)$$

где ω – угловая скорость ротора, рад/с; Q_r – проточный расход воздуха, м³/с; b – ширина зазора между дисками (высота лопаток), м; D – диаметр зоны сепарации, м; ψ – коэффициент сжатия сечения.

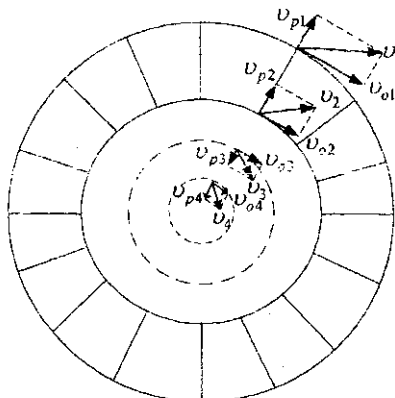


Рис. 2 – Схема скоростей в рабочем органе классификатора

Рассмотрены силы, действующие на частицу в межлопаточном канале дискового ротора. Движение частицы рассматривалось в цилиндрической системе координат. Ось Z направлена вдоль оси вращения ротора, за положительное направление угловой координаты φ принято вращение против часовой стрелки. Радиальная координата r направлена от оси вращения к периферии ротора. Начало координат расположено в плоскости симметрии междискового канала. Схема сил и потоков представлена на рисунке 3.

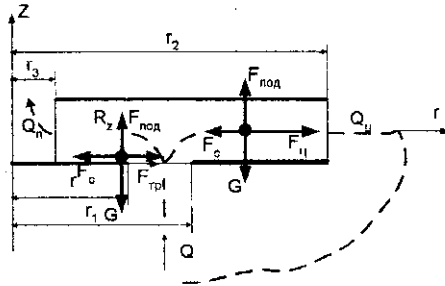


Рис. 3 – Схема сил и потоков в поперечном сечении

Во втором разделе главы произведен расчет внутренних циркуляционных течений в рабочем объеме аппарата на основе вихревой теории лопастных машин. Основное внимание в этой теории уделяется механизму силового и энергетического взаимодействия, количественной оценке действующих при этом сил и механической работы (энергии), развиваемой при их перемещении.

Вся теория расчета процесса центробежной классификации полидисперсных материалов построена на знании истинного расхода воздуха Q в зоне сепарации, величины центробежной силы на границе зоны сепарации и истинного распределения полей скоростей в сепарационной зоне. Исследованиями других авторов и собственными экспериментальными исследованиями установлено, что взаимодействие двух и более потоков приводит к сглаживанию эпюры скоростей даже при ламинарном режиме. Истинный расход воздуха складывается из расхода воздуха, подаваемого с исходным продуктом Q_n , и циркулирующего внутри аппарата $Q_ц$.

Сделано предположение, что суммарная мощность, расходуемая на процесс классификации (N_k) складывается из двух составляющих: мощность, расходуемая на создание внутреннего циркуляционного потока воздуха $Q_ц$ (N_1) и мощности, получаемой проточным потоком воздуха $Q_n(N_2)$, который, как правило, просасывается через классификатор с помощью внешнего вентилятора. Для определения теоретических затрат мощности и соотношения полного расхода воздуха к проточному (кратность циркуляции) определяли значения радиальной и окружной составляющих вектора

скорости потока на входе и выходе межлопаточного канала. Учитывая размеры рабочего органа классификатора и технологические параметры процесса (расход подаваемого воздуха Q_n , частоту вращения ротора n), а также выражения для определения радиальной и окружной скорости (1), мощность, расходуемая на создание внутреннего циркуляционного потока воздуха примет вид

$$N_1 = \rho \cdot Q_4 \left[r_2 \cdot \sqrt{\left(\frac{Q_4}{2\pi \cdot r_2 \cdot b \cdot \Psi \cdot \sin\beta} \right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot r_2 \cdot n}{30} \right)^2} - \frac{Q_4}{\pi \cdot r_2 \cdot b \cdot \Psi \cdot \sin\beta} - \frac{\pi \cdot r_2 \cdot n}{30} \cdot \cos\alpha \times \right. \\ \left. \times \cos\gamma_2 \right] - r \cdot \sqrt{\left(\frac{Q_4}{2\pi \cdot r \cdot b \cdot \Psi \cdot \sin\beta} \right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot r \cdot n}{30} \right)^2} - \frac{Q_4}{\pi \cdot r \cdot b \cdot \Psi \cdot \sin\beta} - \frac{\pi \cdot r \cdot n}{30} \cdot \cos\alpha \cos\gamma} \quad (2)$$

где α, γ – угловые координаты на плане скоростей; β – угол наклона лопатки.

Мощность, получаемую проточным потоком воздуха, определялась по аналогичной формуле с учетом изменения геометрических параметров зоны сепарации

$$N_2 = \rho \cdot Q_n \left[r \cdot \sqrt{\left(\frac{Q_n}{2\pi \cdot r \cdot b \cdot \Psi \cdot \sin\beta} \right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot r \cdot n}{30} \right)^2} - \frac{Q_n}{\pi \cdot r \cdot b \cdot \Psi \cdot \sin\beta} - \frac{\pi \cdot r \cdot n}{30} \cdot \cos\alpha \times \right. \\ \left. \times \cos\gamma - r_3 \cdot \sqrt{\left(\frac{Q_n}{2\pi \cdot r_3 \cdot b \cdot \Psi \cdot \sin\beta} \right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot r_3 \cdot n}{30} \right)^2} - \frac{Q_n}{\pi \cdot r_3 \cdot b \cdot \Psi \cdot \sin\beta} - \frac{\pi \cdot r_3 \cdot n}{30} \cdot \cos\alpha \cos\gamma_3 \right] \quad (3)$$

Для описания гидродинамики циркуляционных течений в центробежном классификаторе были введены безразмерные комплексы: кратность циркуляции K и симплекс геометрического подобия Γ (отношение радиуса границы зоны сепарации к радиусу конца лопатки).

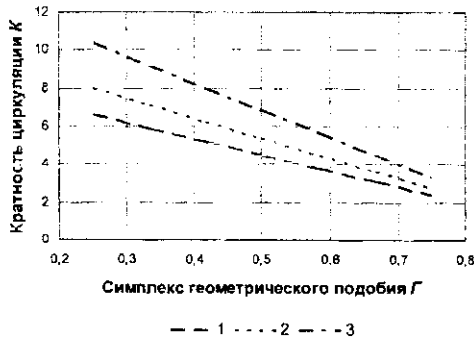


Рис. 4 – Зависимость кратности циркуляции от симплекса геометрического подобия

1 – $Q_n = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$; 2 – $Q_n = 0,008 \text{ м}^3/\text{с}$; 3 – $Q_n = 0,006 \text{ м}^3/\text{с}$.

Расчеты показывают, что с увеличением радиуса ввода потока в межлопастной канал падает доля рециркулирующего потока. В результате математической обработки данных получена зависимость, описывающая соотношение кратности циркуляции, симплекса геометрического подобия и центробежного критерия Рейнольдса Re_c ,

$$K = M \cdot \Gamma \cdot \exp(L \cdot Re_c), \quad (4)$$

где M и L – эмпирические константы.

В третьей части главы на основе аналитических исследований законов распределения частиц по размерам и сравнении их с экспериментальными данными (рис. 5) выявлено, что наиболее точно описывает интегральные кривые распределения исследуемых пищевых порошков закон Розина – Раммлера.

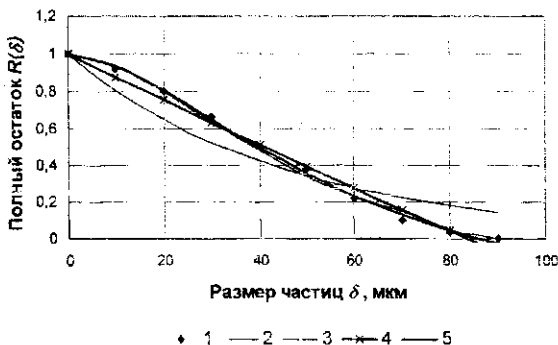


Рис. 5 – Сравнение законов распределений

1 – экспериментальные данные; 2 – распределение Розина-Раммлера; 3 – распределение Мартина; 4 – распределение Годэна-Андреева, 5 – распределение Белоглазова.

Из рис.5 видно, что наиболее грубо описывает кривую распределения закон Мартина, что обусловлено его однопараметрической моделью. В свою очередь законы распределения Годэна – Андреева и Белоглазова не могут описать кривую при размерах частиц близких к максимальному размеру продукта.

В третьей главе приведена схема лабораторной установки и изложена методика проведения экспериментальных исследований гидравлического сопротивления, фракционного состава порошков и их физических свойств, определения среднего размера частиц порошка и фракций после разделения.

Во второй части на основании экспериментов по определению гидравлического сопротивления выявлено, что сопротивление аппарата

возрастает с увеличением частоты вращения ротора и числа лопаток рабочего органа, достигая своего максимального значения при 36 лопатках и частоте вращения ротора 2500 об/мин. При этом, с увеличением частоты вращения ротора, влияние количества лопаток на общее гидравлическое сопротивление уменьшается. Также на величину гидравлического сопротивления влияет высота лопаток, т. е. аппарат, внутри которого расположен ротор с лопатками меньшей высоты, обладает несколько большим сопротивлением. Это объясняется тем, что верхняя часть, отвечающая за высоту канала в роторе, у такого аппарата меньше. Это значит, что при одинаковом числе лопаток площадь живого сечения каналов, образованных этими лопатками, меньше. Соответственно скорость потока в этих каналах больше, а значит и роторы с такими лопатками имеют большее гидравлическое сопротивление.

На основании этих исследований получены критериальные уравнения, описывающие зависимость гидравлического сопротивления от режимных параметров процесса и конструктивных размеров ротора центробежного классификатора

$$Eu = 24,823 Re^{1,623} Re_m^{-1,5}, \quad (5)$$

где $Re = \frac{g_p \cdot d_3 \cdot \rho}{\mu}$ – критерий Рейнольдса;

$Re_m = \frac{v \cdot d_3 \cdot \rho}{\mu}$ – модифицированный критерий Рейнольдса.

На рис. 6 представлена графическая зависимость коэффициента сопротивления аппарата от параметров протекания процесса и конструктивных размеров ротора.



Рис. 6 – Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления аппарата от модифицированного критерия Рейнольдса.

1 – $Re = 1524$; 2 – $Re = 2032$; 3 – $Re = 2540$.

Анализ рис. 6 показывает, что зависимости, представленные на этих рисунках напоминают графики И. Никурадзе для определения коэффициента гидравлического трения. Характер изменения кривой позволяет выделить три зоны: зона ламинарного режима, зона переходного режима и зона

турбулентного режима. Границами этих областей являются значения модифицированного критерия Рейнольдса, лежащие в пределах 4000 и 12000 соответственно.

Перед проведением экспериментов по центробежной классификации определялся гранулометрический состав исходного полидисперсного материала. Дифференциальная кривая распределения частиц пищевой кальциевой добавки по размерам представлена на рис.7. Описание дифференциальной кривой проводилось с использованием закона распределения Розина – Раммлера, явный вид которого представлен выражением.

$$f(\delta) = 0,0156\delta^{0,56}e^{-0,001\delta^{1,56}} \quad (7)$$

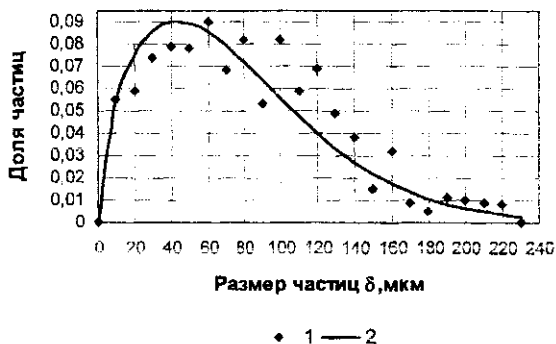


Рис.7 – Дифференциальная кривая распределения частиц исследуемого пищевого порошка по размерам

В результате экспериментов по центробежной классификации универсальной кальциевой добавки были получены выражения, описывающие зависимости среднеквадратичного отклонения (8), среднего (9) и максимального (10) размеров тонкой фракции от кинематических, расходных параметров процесса и конструктивных размеров ротора.

$$\sigma = 38,5 \cdot \left(\frac{Re}{Re_m} \right)^{0,31} \quad (8)$$

$$\delta_{cp} = 10^4 \cdot Re_m^{-0,57319} \quad (9)$$

$$\delta_{max} = 11615 Re_m^{-0,5189} \quad (10)$$

Установлено, что кривые разделения также хорошо описываются законом распределения Розина – Раммлера, который в общем виде имеет вид:

$$\varphi(\delta') = \exp(-a\delta'^{\lambda}), \quad (11)$$

где a и λ – экспериментальные константы;

$\delta' = \delta / \delta_{cp}$ – относительный размер частиц.

В результате математической обработки экспериментальных данных установлено, что экспериментальная константа a практически не изменяется и ее значение равно 0,7, а константа λ является функцией частоты вращения и может быть определена по выражению

$$\lambda = \lambda_{\min} \cdot \left(\left(\Gamma_n^2 - 1 \right)^2 \right)^{-0,12}, \quad (12)$$

где $\Gamma_n = \frac{n}{n_{\max}}$ – симплекс подобия по частоте вращения;

n_{\max} – частота вращения, соответствующая максимальному значению показателя степени;

λ_{\min} – минимальное значение показателя степени при малых частотах вращения.

На основании полученных результатов по центробежной классификации кальциевой пищевой добавки были определены качественные показатели процесса, на основании которых определялся единый параметр – качество классификации (рис.8).

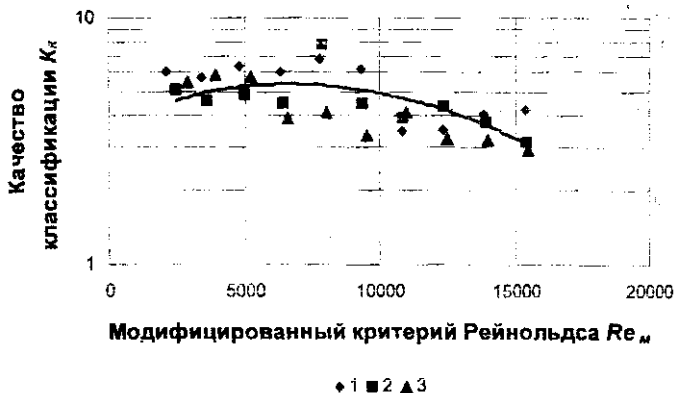


Рис. 8 – Зависимость качества классификации от модифицированного критерия Рейнольдса

1 – $Re = 1524$; 2 – $Re = 2032$; 3 – $Re = 2540$, сплошная линия – расчет по выражению (13).

Получено выражение, описывающее зависимость этого показателя от параметров процесса и конструктивных размеров ротора.

$$K_k = K_{\min} \cdot \left[\left(\left(Re_m / Re_m^{\max} \right)^2 - 1 \right)^2 + 0,1 \cdot \left(Re_m / Re_m^{\max} \right)^2 \right]^{-0,194}, \quad (13)$$

где K_{min} – значение показателя качества классификации при минимальных значениях модифицированного критерия Рейнольдса ($K_{min}=5$);

Re_m^{max} – значение модифицированного критерия Рейнольдса, соответствующее максимальному значению качества классификации ($Re_m^{max}=7500$).

В четвертой главе приведена методика инженерного расчета конструктивных размеров и режимных параметров центробежного классификатора, прогнозируемых значений показателей качества процесса (среднеквадратичного отклонения, среднего и максимального размеров частиц мелкой фракции). Построены прогнозируемые кривые разделения в безразмерном виде и распределения частиц по размерам в дифференциальном виде. Приведена методика расчета и подбора вспомогательного оборудования (циклон, фильтр, вентилятор) для технологической линии производства пищевой добавки с производительностью по исходному продукту 100 кг/ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В настоящее время наиболее перспективным направлением при конструировании центробежных классификаторов для разделения тонкодисперсных пищевых материалов является проектирование аппаратов роторного типа, что объясняется большим фактором разделения у аппаратов данного типа, чем у аппаратов инерционного типа. Преимущественные конструктивные признаки у проектируемых классификаторов являются: цилиндроконический корпус, вертикальный приводной вал, один входной и два выходных патрубка и лопастной ротор [3,7,8,18].
2. На основании вихревой теории получено выражение, позволяющее рассчитать величину циркулирующего потока воздуха внутри классификатора и затраты мощности на процесс [17]. Наибольшим влиянием на эти параметры оказывают радиус ввода потока на рабочий орган аппарата, радиус самого рабочего органа, частота вращения, угол наклона лопатки к радиусу и ее ширина.
3. Установлена зависимость гидравлического сопротивления аппарата от параметров проведения процесса классификации и конструктивных размеров рабочего органа аппарата [5,15]. Полученные критериальные уравнения, описывающие зависимость гидравлического сопротивления от режимных параметров процесса и конструктивных размеров ротора [11,12] позволяют вести расчет геометрически подобных аппаратов.
4. Для описания интегральных и дифференциальных кривых распределения частиц пищевых добавок по размерам наиболее точно подходит закон распределения Розина-Раммлера [9,13,16]. При проведении экспериментальных исследований по классификации полидисперсных пищевых порошков установлено, что средний размер и среднеквадратичное отклонение частиц полученных фракций уменьшается с увеличением

частоты вращения ротора [6]. Определены качественные характеристики процесса классификации [14] и впервые получены уравнения, описывающие их зависимость от параметров процесса и размеров ротора.

5. На основании экспериментов разработана методика расчета конструктивных размеров центробежного классификатора роторного типа, а также получена возможность прогнозировать фракционный состав мелкой фракции и рассчитать прогнозные показатели процесса центробежной классификации полидисперсных пищевых порошков. Разработана новая конструкция центробежного классификатора [19], прошедшая опытно-промышленную проверку в производственных условиях, которая позволяет повысить производительность измельчителя [1,2] и наладить массовое производство отечественной пищевой добавки с ожидаемым экономическим эффектом в 109,7 тыс. рублей от производства 1 кг добавки по сравнению с импортным аналогом.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ.

1. Киркор М.А. Моделирование процессов классификации полидисперсных материалов в процессе измельчения // Материалы II международной научной конференции студентов и аспирантов «Техника и технология пищевых производств». Могилев: Могилевский технологический институт, 1999. – С. 133 – 134.
2. Шуляк В.А., Киркор М.А. Моделирование процессов разделения полидисперсных материалов при измельчении // Материалы II международной научно-технической конференции «Техника и технология пищевых производств». Могилев: Могилевский технологический институт, 2000. – С. 202 – 203.
3. Шуляк В.А., Киркор М.А. Анализ основных направлений конструирования центробежных классификаторов // Материалы II международной научно-технической конференции «Техника и технология пищевых производств». Могилев: Могилевский технологический институт, 2000. – С. 203 – 204.
4. Киркор М.А., Шуляк В.А. Лабораторная установка для классификации полидисперсных материалов // Материалы III международной научной конференции студентов и аспирантов «Техника и технология пищевых производств». Могилев: Могилевский государственный технологический институт, 2001. – С. 5 – 6.
5. Шуляк В. А., Киркор М. А. Исследование гидродинамических режимов работы центробежных классификаторов // Материалы III международной научно-технической конференции «Техника и технология пищевых производств». Могилев: Могилевский государственный технологический институт, 2002, – С. 242 – 243.
6. Шуляк В.А., Киркор М.А. Процесс разделения пищевых порошков в центробежном классификаторе // Материалы международной научно – технической конференции «Новые технологии в химической

- промышленности». Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2002. – С. 243 – 245.
7. Шуляк В.А., Киркор М.А. Разработка и исследование центробежных классификаторов для разделения порошковых материалов // *Материалы международной научно – технической конференции «Современные технологии, материалы, машины и оборудование»*. Могилев: Могилевский государственный технический университет, 2002. – С. 266 – 267.
 8. Шуляк В.А., Киркор М.А. Разработка высокоэффективных аппаратов для механической и механотермической обработки дисперсных материалов // *Сборник научных трудов к 30 – летию Могилевского государственного университета продовольствия*. Минск: Издательский центр БГУ, 2003. – С. 165 – 172.
 9. Шуляк В. А., Киркор М. А. Анализ дисперсного состава порошков, разделяемых в центробежном классификаторе // *Материалы IV международной научно–технической конференции «Техника и технология пищевых производств»*. Могилев: Могилевский государственный университет продовольствия, 2003. – С. 300 – 301.
 10. Шуляк В.А., Киркор М.А. Разработка аппаратов для центробежной классификации пищевых порошков и оптимизация их гидродинамических режимов// *Сборник научных трудов к 30-летию кафедры «Машины и аппараты пищевых производств» Могилевского государственного университета продовольствия*. Минск: Издательский центр БНТУ, 2004. – С. 33 – 35.
 11. Лютомская Е.Ю., Новикова М.Н., Киркор М.А. Критериальные уравнения гидродинамических режимов работы центробежных классификаторов // *Материалы IV международной научной конференции студентов и аспирантов «Техника и технология пищевых производств»*. Могилев: Могилевский государственный университет продовольствия, 2004. – С. 166.
 12. Киркор М.А. Лютомская Е.Ю., Новикова М.Н. Сравнительная оценка центробежных классификаторов // *Материалы IV международной научной конференции студентов и аспирантов «Техника и технология пищевых производств»*. Могилев: Могилевский государственный университет продовольствия, 2004. – С. 167.
 13. Центробежная классификация полидисперсных материалов / Киркор М.А., Шуляк В.А. // *Хранение и переработка сельхозсырья*. – 2005, № 2, с. 58 – 60.
 14. Центробежная классификация порошков / Шуляк В.А., Киркор М.А. // *Обогащение руд*. – 2005. – № 2. – С. 15 – 17.
 15. Центробежная классификация пищевых порошков / Шуляк В.А., Киркор М.А. // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. – 2005. – № 2-3. – С. 91 – 93.
 16. Киркор М.А., Шуляк В.А. Оценка эффективности процесса классификации // *Материалы V международной научно - технической конференции «Техника и технология пищевых производств»*. Могилев:

Могилевский государственный университет продовольствия, 2005. – С. 207.

17. Киркор М.А., Шуляк В.А. Гидродинамика внутренних циркуляционных течений в центробежном классификаторе // Материалы V международной научно - технической конференции «Техника и технология пищевых производств». Могилев: Могилевский государственный университет продовольствия, 2005. – С. 224.
18. Киркор М.А., Шуляк В.А. Центробежный классификатор для разделения полимерных порошков // Тезисы докладов международной научно – технической конференции «Полимерные композиты и триботехнология (Поликонтраб – 2005)». Гомель: Институт механики металлополимерных систем им. В.А.Белого, 2005. – С. 272 – 273.
19. Пат. 7793 М.кл.⁷ В07 В7/083. Центробежный классификатор для разделения полидисперсных материалов / Шуляк В.А., Киркор М.А. (РБ). – а 20020944; Заявлено 26.11.2002; Опубл. 28.02.2006, Бюл. № 1.

РЭЗЮМЕ

Кіркор Максім Аляксандравіч

Цэнтрабежная класіфікацыя харчовых полідысперсных матэрыялаў у апарате ротарнага тыпу

ЦЭНТРАБЕЖНЫ КЛАСІФІКАТАР, ЦЫРКУЛЯЦЫЙНЫ ПАТОК ГІДРАЎЛІЧНАЕ СУПРАЦЬУЛЕННЕ, ГРАНУЛАМЕТРЫЧНЫ САСТАЎ, ЗАКОН РАЗМЕРКАВАННЯ, КРЫВАЯ РАЗДЗЯЛЕННЯ

У працы даследуецца працэс цэнтрабежнай класіфікацыі полідысперсных харчовых парашкоў. Мэтай працы з'яўляецца атрыманне ўраўненняў, апісваючых залежнасці паказчыкаў працэсу ад рэжымных параметраў і канструктыўных памераў рабочага органа апарата.

На падставе патэнтнай інфармацыі выяўлен найбольш перспектыўны напрамак у канструяванні цэнтрабежных класіфікатараў для раздзялення полідысперсных харчовых парашкоў. Сфарміраваны крытэрыі стварэння новых апаратаў ротарнага тыпу, на падставе якіх распрацавана і выраблена лабараторная ўстаноўка для цэнтрабежнай класіфікацыі кальшыевага харчовага дадатку. Распрацаваны цэнтрабежны класіфікатар прайшоў воньгітна - прамысловыя выпрабаванні на ААТ "Магілёўскі жэлацінавы завод".

На аснове віхравой тэорыі лопасцевых машын створана матэматычная мадэль руху патокаў унутры карпуса апарата і выяўлены параметры, якія ўплываюць на іх велічыню. Атрыманая залежнасці кратнасці цыркуляцыі ад кінематычных параметраў працэсу, на падставе якіх можна вызначыць велічыню цыркуляцыйнага патока. З вядомых законаў, апісваючых грануламетрычны састаў полідысперснага матэрыяла, выяўлены закон найбольш сапраўдна апісваючы гэты параметр.

На падставе эксперыментаў па цэнтрабежнай класіфікацыі харчовага дадатку ўпершыню атрыманы выразы, апісваючыя залежнасці асноўных параметраў атрыманай дробнай фракцыі ад кінематычных і расходных характарыстык працэсу і канструктыўных памераў рабочага органа апарата. Выяўлены аптымальныя тэхналагічныя параметры працэсу, пры якіх якасныя характарыстыкі маюць найбольшае значэнне. Усталявана ўзаемасувязь гэтых параметраў з гідрадынамікай руху патокаў у апарате.

На падставе ўпершыню атрыманых залежнасцяў распрацавана метадыка інжынернага разліку канструкцыі цэнтрабежнага класіфікатара ротарнага тыпу і метадыка прагназіравання асноўных параметраў дробнай фракцыі, зыходзячы з зададзенай прадукцыйнасці па зыходнаму прадукту і неабходнаму межаваму памеру.

РЕЗЮМЕ

Киркор Максим Александрович

Центробежная классификация пищевых полидисперсных материалов в аппарате роторного типа

ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ КЛАССИФИКАТОР, ЦИРКУЛЯЦИОННЫЙ ПОТОК, ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ, ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, КРИВАЯ РАЗДЕЛЕНИЯ

В работе исследуется процесс центробежной классификации полидисперсных пищевых порошков. Целью работы является получение уравнений, описывающих зависимости показателей процесса от режимных параметров и конструктивных размеров рабочего органа аппарата.

На основании патентной информации выявлено наиболее перспективное направление в конструировании центробежных классификаторов для разделения полидисперсных пищевых порошков. Сформированы критерии создания новых аппаратов роторного типа, на основании которых разработана и изготовлена лабораторная установка для центробежной классификации кальциевой пищевой добавки. Разработанный центробежный классификатор прошел опытно – промышленные испытания на ОАО «Могилевский желатиновый завод».

На основе вихревой теории лопастных машин создана математическая модель движения потоков внутри корпуса аппарата и определены параметры, влияющие на их величину. Получены зависимости кратности циркуляции от кинематических параметров процесса, на основании которых можно определять величину циркуляционного пока. Из известных законов, описывающих гранулометрический состав полидисперсного материала, определен закон, наиболее точно описывающий этот параметр.

На основании экспериментов по центробежной классификации пищевой добавки впервые получены выражения, описывающие зависимости основных параметров полученной мелкой фракции от кинематических и расходных характеристик процесса и конструктивных размеров рабочего органа аппарата. Определены оптимальные технологические параметры процесса, при которых качественные характеристики имеют наибольшее значение. Установлена взаимосвязь этих параметров с гидродинамикой движения потоков в аппарате.

На основании впервые полученных зависимостей разработана методика инженерного расчета конструкции центробежного классификатора роторного типа и методика прогнозирования основных параметров мелкой фракции исходя из заданной производительности по исходному продукту и необходимому граничному размеру.

SUMMARY

Kirkor Maxim Aleksandrovich

The centrifugal classification of food polydisperse materials in the devise of rotor type

THE CENTRIFUGAL QUALIFIER, CIRCULATING STREAM, HYDRAULIC RESISTANCE, GRANULOMETRIC STRUCTURE, THE LAW OF DISTRIBUTION, THE CURVE OF DIVISION

Process of centrifugal classification of polydisperse food powders is investigated in this work. The purpose of work is reception of the equations describing dependences of process parameters from regime parameters and the constructive sizes of working body of the device.

On the basis of the patent information the most perspective direction in designing centrifugal qualifiers for division of polydisperse food powders was revealed. Criteria of creation of new devices of rotor type on the basis of which laboratory installation for centrifugal classification of calcium food additive were developed and made were generated. The developed centrifugal qualifier has passed skilled-industrial tests at Open Stock Company « Mogilev gelatinous factory ».

On the basis of the vortical theory of locinate machines the mathematical model of movement of streams inside the case of the device was created and the parameters influencing their size were determined. Dependences of frequency rate of circulation on kinematic parameters of process on the basis of which it is possible to define the size of circulating stream were received. From the known laws describing granulometric structure of a polydisperse material, the law most precisely describing this parameter were determined.

On the basis of experiments on centrifugal classification of food additive the expressions describing dependences of key parameters of received fine fraction from kinematic and account characteristics of process and the constructive sizes of working body of the device for the first time were received. Optimum technological parameters of process at which qualitative characteristics have the greatest value were determined. The interrelation of these parameters with hydrodynamics of stream movement in the device was established.

On the basis of the first time the received dependences the technique of engineering calculation of a design of the centrifugal qualifier of rotor type and a technique of forecasting of key parameters of fine fraction proceeding from the set productivity on an initial product and the necessary boundary size was developed.