ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2494
https://elibrary.ru/HGUBMZ

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Пневмоцентробежная классификация дисперсных частиц в процессе переработки зерна в муку

О. Н. Терехова*, Я. С. Дуюнова

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, Барнаул, Россия

Поступила в редакцию: 26.05.2023
Принята после рецензирования: 29.09.2023
Принята к публикации: 03.10.2023

**О. Н. Терехова: onter@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3832-8111*
Я. С. Дуюнова: https://orcid.org/0009-0003-1944-8841

© О. Н. Терехова, Я. С. Дуюнова, 2024

Аннотация.
В России наблюдается спрос на мучную продукцию, вырабатываемую с использованием «сухого» метода получения крахмала и клейковины. Целью работы являлось исследование параметров пневмоцентробежной классификации тонкодисперсных частиц в спиральном классификаторе-отделителе, предназначенном для разделения продуктов размола зерна на фракции, которые отличаются комплексом свойств, отделения твердой фазы от воздуха и выделения из общего потока продуктов размола высокобелковой фракции муки.
Объект исследования – процесс пневмоклассификации продуктов размола зерна. Применили математическое моделирование и провели эксперимент. Аналитически рассмотрели процесс движения и осаждения частиц в рабочей зоне классификатора. Изучили влияние на характер траекторий движения частиц, их осаждение массы и плотности, скорость воздуха и соотношение геометрических параметров канала. Экспериментально определили влияние на общую эффективность процесса классификации скорости движения воздуха и концентрации аэросмеси.
Получили результаты по режимам классификации для частиц с различных размольных и драных систем, которые отличаются скоростями витания, размерами и плотностью. При скорости воздуха от 6 до 8 м/с на первом витке спирального классификатора с отношением внутреннего радиуса змеевика к внутреннему диаметру трубы $r_1/d_{тр}$ = 7,9, на втором витке при $r_1/d_{тр}$ = 7, на третьем витке при $r_1/d_{тр}$ = 6,25. На последующих витках при $r_1/d_{тр}$ < 5 выделяется фракция размером до 160 мкм, в том числе мелкие высокобелковые фракции муки с размером частиц 17–20 мкм. Около 80 % продукта оседает на первом витке, на втором около 12 % продукта, а на третьем около 8 % продукта. Максимальная эффективность отделения продукта третьей драной системы достигает 98 % при входной скорости 6 м/с. Максимальная эффективность отделения муки высшего сорта достигает 99,2 % при входной скорости 4,2 м/с.
Полученные результаты подтверждают возможность использования классификатора для разделения продуктов измельчения зерна пшеницы на фракции по комплексу свойств с выделением высокобелковой фракции муки и отделением дисперсного продукта от воздушного потока как в качестве самостоятельного устройства, так и при работе в технологической схеме сортового помола зерна в муку на этапе работы сепараторов и разгрузчиков пневмотранспортных систем.

Ключевые слова. Мука, продукты размола, фракции муки, высокобелковая фракция, дисперсная частица, воздух, спираль, классификатор

Финансирование. Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы кафедры машины и аппараты пищевых производств на базе учебно-исследовательской лаборатории вентиляции Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова (АлтГТУ).

Для цитирования: Терехова О. Н., Дуюнова Я. С. Пневмоцентробежная классификация дисперсных частиц в процессе переработки зерна в муку // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 124–134. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2494

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2494
https://elibrary.ru/HGUBMZ

Original article
Available online at https://fptt.ru/en

Pneumocentrifugal Classification of Dispersed Particles during Grain Milling

Olga N. Terekhova*, Yana S. Duyunova

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Received: 26.05.2023
Revised: 29.09.2023
Accepted: 03.10.2023

**Olga N. Terekhova: onter@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3832-8111*
Yana S. Duyunova: https://orcid.org/0009-0003-1944-8841

© O.N. Terekhova, Ya.S. Duyunova, 2024

Abstract.
Russia enjoys a stable demand for flour products, including those obtained by the dry method of starch and gluten production. This study featured pneumocentrifugal parameters of fine particles in a spiral separator that classified milled grain into fractions, separated the solid phase from air, and identified the high-protein flour fraction in the flow.
Pneumatically classified flour was subjected to mathematical modeling and experimental research. The analysis of movement and deposition of particles in the working area covered particle mass, density, air-flow rate, and geometry, as well as their effect on the trajectory of particle movement and deposition. The experiment also involved the effect of air-flow rate and air-mix concentration on the classification efficiency.
Particles from various grinding and break systems demonstrated classification modes that differed in soaring rate, size, and density. At an air-flow rate of 6–8 m/s, turn 1 of the spiral separator had the ratio of the internal coil radius to the inner pipe diameter as r_1/d_{pipe} = 7.9; it was r_1/d_{pipe} = 7 on turn 2 and fell down to r_1/d_{pipe} = 6.25 on turn 3; for all subsequent turns, the ratio was r_1/d_{pipe} < 5. Under these conditions, the fraction reached 160 µm and included small high-protein flour fractions with a particle size of 17–20 µm. The percentage of product accumulated on turns 1, 2, and 3 was 80, 12, and 8%, respectively. The maximal product separation efficiency of the third drain system was as high as 98% at an input rate of 6 m/s. The maximal separation efficiency for premium flour reached 99.2% at an input rate of 4.2 m/s.
The separator proved efficient in classifying wheat grain flour into fractions as it was able to separate high-protein fraction and dispersed particles from the air flow. The separator could be used both as an independent device and as part of a complex technological scheme at the stage of pneumatic separators and unloaders.

Keywords. Flour, milling products, flour fractions, high-protein fraction, dispersed particle, air, spiral, separator

Funding. The research was performed at the Department of Food Production Equipment and the Academic and Research Ventilation Laboratory, Polzunov Altai State Technical University (AltSTU).

For citation: Terekhova ON, Duyunova YaS. Pneumocentrifugal Classification of Dispersed Particles during Grain Milling. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):124–134. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2494

Введение

Процессы переработки зерна в муку предусматривают многократное измельчение зерна и продуктов его размола и разделение полученных веществ на фракции. Эти фракции отличаются комплексом физико-механических свойств в соответствии с требованиями ведения технологического процесса, ассортиментом и назначением готового продукта. Существующие устройства и способы не всегда отвечают возросшим требованиям рынка потребления. Помимо стандартной сортовой классификации муки, есть потребность в ее видах с повышенным или пониженным содержанием отдельных компонентов. Например, белка или крахмала, которые используются для специальных видов хлеба и кондитерских изделий [1]. Процесс производства муки всегда занимал важное место в перерабатывающем производстве, его нуждам были подчинены энергетические и сырьевые ресурсы. Однако современные реалии требуют рационального природопользования и энергосбережения при сохранении качественных показателей и соблюдении требований экологичности и безопасности производства. Не менее важно решение проблемы обеспечения населения качественными продуктами питания, в частности функционального назначения, спрос на которые возрос. Это подтверждают исследования в данной области [2, 3].

Химический состав хлеба и хлебобулочных изделий должен соответствовать возрастной категории, характеру занятий, особенностям здоровья и другим потребительским критериям выбора. Сегодня в ряде

стран актуальна такая проблема, как непереносимость белка злаковых культур – глютена [4]. Разработано большое количество продуктов на основе муки различных культур, которые не имеют в своем составе глютена, в том числе макаронных изделий [5]. Многие исследования в данной области направлены на изучение свойств глютена и снижение его токсичных свойств. Например, через удаление из него аллергенной фракции – глиадина [6].

Регулирование в составе муки и хлеба количества белка и крахмала требует создания новых способов и устройств для получения фракций с их различным содержанием, простых по своей конструкции, доступных по цене, легких в эксплуатации и многофункциональных. Это актуально для малого перерабатывающего производства и фермерских хозяйств, работающих в агропромышленном комплексе, которые не могут использовать развитую технологическую цепочку, как крупные переработчики. Сократить расходы на получение продуктов размола зерна без ущерба качеству и экологии возможно, например, при совмещении технологических и транспортных операций и процессов обеспыливания [7, 8]. Традиционный способ получения высокобелковой муки используется на хлебокомбинатах с пневмотранспортом муки и продуктов размола на этапе работы циклонов – разгрузителей – благодаря задержке в них только основной части продукта (более крупная фракция), а самая мелкая фракция, которая содержит больше белка, улетучивается с воздухом и улавливается на фильтре. Изучив теорию циклонной очистки воздуха, мы пришли к выводу, что в формируемых в циклоне спиральных потоках воздуха способен отделиться лишь определенный диапазон частиц. Дисперсность отделяемой в циклоне частицы зависит от вязкости воздуха, наружного радиуса циклона, плотности пыли и частоты ее вращения, числа витков, которые совершает частица [9, 10].

Эффективность сепарации центробежного пылеотделителя зависит от его конструктивного исполнения, оптимальной входной скорости воздуха и свойств самой пыли. Вязкость для данного состояния воздуха – это величина постоянная, как и плотность для пыли данного типа. Уменьшать отношение наружного радиуса циклона к внутреннему невозможно до бесконечности. Следовательно, чтобы повысить эффективность сепарации мелкодисперсной пыли в центробежном пылеотделителе, необходимо увеличить частоту вращения частиц или создать такие условия сепарации, при которых частица совершала бы максимальное число витков, двигаясь по винтовой траектории. Эффект воздушной классификации тонкодисперсного материала подтверждается исследованиями, направленными на разработку соответствующих устройств и способов [11–13].

Вопросы сепарации мелкодисперсных частиц привели к созданию конструкций, которые позволяют увеличить действие центробежных сил. Например, роторные центробежные сепараторы, используемые рядом отраслей промышленности при производстве тонкодисперсных порошков, в газоочистке и центрифугировании жидких сред [14–18]. Однако конструкции с роторной частью требуют дополнительных энергозатрат на привод вращающихся элементов, они сложны в эксплуатации и обслуживании.

Идея создания спирального классификатора возникла на основе анализа поведения аэродисперсного потока в центробежно-гравитационном пылеотделителе – циклоне, где отделение твердой фракции осуществляется на витках спирали, образованной нисходящим потоком воздуха. Диаметр витка определяется размерами корпуса циклона и предполагает отделение фракций лишь какой-то одной дисперсности. В нашем способе возможен одновременный отбор различных частиц при одновременном отделении твердой фазы от воздуха. Мы предложили способ отделения мелкодисперсных частиц в спиральном классификаторе, который позволяет отбирать каждую фракцию дисперсной фазы в пределах своего витка гибкого трубопровода уменьшающегося диаметра. Данный способ защищен патентом РФ, его работоспособность подтверждена экспериментально [8, 19].

Посредством воздействия на продукт воздушного потока производят процесс классификации различных материалов в мукомолье, например, разделяя по добротности продукты размола на ситовеечных машинах, а также выделяют крахмальную и белковую фракции из муки различных культур [20, 21]. «Сухой способ» получения крахмала из семян злаковых культур посредством пневмоклассификации, основанный на разности плотностей белка и крахмала, представляет большой интерес, т. к. является более экологичным и экономичным [22, 23].

Научное исследование сегодня невозможно без современных методов моделирования и расчета: компьютерные системы и программные продукты используются при разработке новых функциональных пищевых продуктов, а также автоматизации технологических линий пищевых производств. При помощи современных средств компьютерного проектирования и моделирования создаются сбалансированные рецептурные решения и определяются оптимальные кинематические, аэродинамические и другие технические параметры различных пищевых систем [24–27].

Целью работы являлось исследование параметров пневмоцентробежной классификации тонкодисперсных частиц в спиральном классификаторе-отделителе, который предназначен для разделения продуктов размола зерна на фракции, отличающиеся комплексом свойств, отделения твердой фазы от воздуха и выделения из общего потока продуктов размола высокобелковой фракции муки, а также выявление общих закономерностей влияния на процесс классификации таких параметров, как концентрация исходной аэродисперсной смеси, скорость движения воздуха в канале и соотношение геометрических параметров спирального канала сепаратора.

Объекты и методы исследования

Объектами на разных этапах работы являлись:

– процесс пневмоцентробежной классификации полидисперсных частиц в спиральном классификаторе. Моделирование процесса производилось при помощи компьютерной программы, разработанной на основе решения дифференциальных уравнений движения частиц в рабочей зоне;
– мука высшего первого и второго сортов, произведенная по ГОСТ Р 52189-2003;
– продукты размола зерна пшеницы при сортовом помоле зерна с первой, второй и третьей драных систем;
– продукты размола с размольных систем;
– мука высокобелковая.

Определение размеров частиц отделяемых фракций осуществлялось по ГОСТ 27560-87. Количество клейковины устанавливали по ГОСТ 27839-88. Скорость движения воздуха в каналах спирального классификатора определяли по ГОСТ 17.2.4.06-90.

Измерение скорости и расхода воздуха осуществляли косвенным методом через измерение динамических давлений при помощи манометра дифференциального цифрового типа ДМЦ-01 модификации «М» (с обработкой данных) в комплекте с напорными трубками модификации Пито в соответствии с ГОСТ 8.361-79. Прибор ДМЦ-01М позволяет рассчитать скорость и объемный расход газа в одной точке поперечного сечения канала.

Планирование эксперимента, статистическую обработку опытных данных и анализ полученных результатов проводили классическим методом и с помощью стандартных программ. Для получения математической модели исследуемого процесса, которая учитывает изменение нескольких факторов, влияющих на процесс, использовали методы математического планирования эксперимента. Обработку результатов полных факторных экспериментов проводили по алгоритму Иойтса. Для статистического анализа значимости коэффициентов регрессии использовали метод наименьших квадратов.

Спланировали и поставили двухфакторный эксперимент ПФЭ2. Ввод данных и вывод результата осуществляется с экрана в виде матрицы или графика. Все исследования проводили в 3-кратной повторности с обработкой результатов в математическом редакторе Mathcad.

Основным критерием оптимизации параметров процесса пневмоцентробежной классификации являлась его эффективность, т. е. четкость разделения на фракции полидисперсного продукта на соответствующем витке и степень отделения от воздуха тонкой пылевой фракции дисперсной фазы. В качестве параметров оптимизации будем рассматривать соотношение таких конструктивных размеров, как диаметр витка к его радиусу для выделения фракции определенного размера, а также аэродинамических свойств: скорость движения воздушного потока в сепарационной зоне в зависимости от скорости витания отделяемых частиц.

С точки зрения математического моделирования критерием эффекта сепарации дисперсных частиц из воздушного потока является их осаждение на криволинейной поверхности спирального витка, т. е. момент, при котором частица достигает поверхности сепарационной зоны, в нашем случае внутренней поверхности внешней стенки спирального витка, т. е. путь, пройденный частицами, и разность в координатах частиц, которая определяется построением траекторий движения частиц, полученных на основе решения дифференциальных уравнений ее движения.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрели процесс пневмоцентробежной классификации мелкодисперсных частиц, которые поступают с потоком воздуха в спиральный классификатор, образованный витками гибкого трубопровода уменьшающегося радиуса. Полидисперсный продукт подается в спиральный классификатор потоком воздуха, где под действием комплекса сил разделяется на фракции, которые отличаются физико-механическими и аэродинамическими свойствами. Более крупные частицы проходят меньший путь до их оседания на поверхности витков спирального классификатора и раньше попадают в осадочную камеру первого витка, а затем выводятся из устройства [7, 8]. Подобные выводы представлены в других работах, авторы которых отметили, что часть газа, отобранная у внешней стенки, содержит пыль крупных фракций [12, 13]. Частицы средней дисперсности проделывают больший путь и оказываются в зоне осаждения второго витка, а для осаждения самых мелких частиц необходимо большее время релаксации. Их осаждение происходит на дальних витках самого меньшего радиуса.

Изучение траекторий движения частиц и их взаимовлияние на основе математического моделирования проводят с целью установления характера процесса классификации полидисперсного потока в пределах сепарационной зоны криволинейных каналов для определения оптимальных параметров процесса, размеров и конструктивных особенностей соответствующих устройств [28–31].

Рассмотрели движение частиц в пределах одного витка спирального сепаратора. Для этого провели анализ сил, действующих на одиночную частицу в потоке газа в криволинейном спиральном канале, для установления характера ее движения. Кроме силы тяжести, на частицу действуют силы аэродинамической природы, несущие двухмерный поток. Канал имеет криволинейную траекторию с радиусом кривизны r, а также постоянное сечение диаметром d. Дисперсный поток в винтовом криволинейном канале классификатора движется из-за разности давлений, создаваемых вентилятором. В спиральный канал подается воздушно-пылевой поток из аспирационной сети или продукты размола зерна системой пневмотранспортирования с параметрами Q, м^3/с, и v, м/с. Частицы,

осевшие на поверхности канала, затем могут быть направлены в сборники для соответствующих фракций посредством виброперемещения.

При рассмотрении сил, действующих на частицу, предполагают, что скорость частицы может быть больше или меньше скорости потока. В общем случае характер движения частиц в криволинейном потоке и сил, действующих на частицы, указывает на наиболее значимые из них [32].

На рисунке 1 представлена схема сил, действующих на частицу, если скорость потока u больше скорости частицы v. Относительная скорость частицы $W = U - V$. Таким образом, при движении в криволинейном канале постоянного сечения на частицу в воздушном потоке действуют следующие силы:

– сила сопротивления

$$F_c = 0{,}5\rho_c\xi(\overline{u} - \overline{\upsilon})\left|\overline{u} - \overline{\upsilon}\right|S_m \quad (1)$$

где ξ – коэффициент сопротивления, определяемый через критерий Рейнольдса, т. е. $\xi = f(Re)$; S_m – площадь миделева сечения сферической частицы, м^2;

– сила инерции частицы, обусловленная градиентом скорости потока воздуха

$$F_{\div.\grave{e}} = m(d\omega/dt) \quad (2)$$

– сила инерции частицы, вызываемая изменением относительной скорости

$$F_{\tilde{a}.\grave{e}} = m(du/dt) \quad (3)$$

– тангенциальная сила инерции частицы

$$F_{\times.\grave{O}} = -2m\omega_{\grave{a}}\overline{u} \quad (4)$$

– сила Кориолиса

$$F_{\hat{e}\grave{i}\eth} = -2m\omega_{\grave{a}}\overline{\varpi} \quad (5)$$

– сила тяжести

$$F_g = mg \quad (6)$$

– сила Архимеда

$$F_{\text{А}} = V_{\text{ч}} \times \rho \times g = \frac{1}{6}\pi \times d_{\text{э}}^3 \times \rho \times g \quad (7)$$

– сила Магнуса, проекции которой на оси X и У имеют вид

$$F_{Mx} = -\frac{1}{8}\pi^2 d^3 \rho_{\div}\left(\upsilon_x - u_x\right) \times \omega_{\div} \quad (8)$$

$$F_{My} = -\frac{1}{8}\pi^2 d^3 \rho_{\div}\left(\upsilon_y - u_y\right) \times \omega_{\div} \quad (9)$$

На частицу также будут действовать сила противодавления $\overrightarrow{F_p}$ и сила Бассе $\overrightarrow{F_b}$. Однако характер действия ряда сил не сопоставим по своей величине с аэродинамической силой $\overrightarrow{F}$. Поэтому они не оказывают

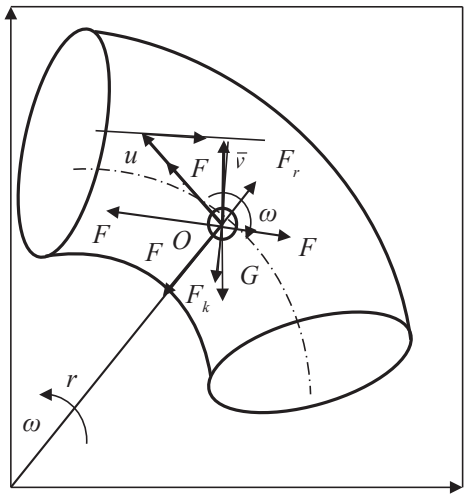

Рисунок. 1 Схема действующих на частицу сил в витке спирального классификатора

Figure 1. Forces that affect particles in the coil of the spiral classifier

большого влияния на поведение частиц. Для решения данной задачи газодинамики аэрозоля начнем с ее формализации. Мы задали следующие условия процесса:

– в канале движется одиночная частица, не учитывая фактор взаимодействия частиц друг с другом, коагуляцию частиц и явление сцепления частиц с образованием укрупненных единиц – конгломератов, приняв условие постоянства массы частицы в процессе ее движения;
– скорость и расход воздуха в любом сечении канала является величиной постоянной, поскольку перепад давления в классификаторе будет незначителен (до 1200 Па). Поэтому сжимаемостью воздуха можно пренебречь и объемный расход Q воздуха на входе и на выходе из спирального канала считать постоянным, применив уравнение неразрывности потока;
– воспользуемся понятием средней скорости воздуха как фиктивной скорости, обеспечивающей заданный расход воздуха в любом сечении;
– частицы равномерно распределены по сечению;
– эффектом сепарации частицы будем считать момент достижения ею внешней стенки криволинейного канала;
– частицы, достигшие поверхности криволинейного канала, непрерывно выводятся, не препятствуя осаждению других частиц;
– концентрация аэросмеси не оказывает характерного влияния на движение дисперсных частиц;
– движение частицы в газовом потоке подчиняется закону Стокса.

Движение дисперсного потока происходит в канале, поэтому представим уравнение в цилиндрических координатах z, r и φ. При этом

$$\frac{dz}{dt} = U_z \quad (10)$$

$$\frac{dr}{dt} = U_r \quad (11)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega^* \quad (12)$$

где U_z – скорость движения частицы вдоль оси Oz; U_r – скорость радиального дрейфа частицы; ω^* – условная угловая скорость частицы, которую можно выразить через касательную составляющую скорости частицы. В общем случае $\omega^* \neq \omega$, т. е. угловой скорости потока, ω^* = const.

В общем виде дифференциальное уравнение движения частицы в канале спирального классификатора в векторной форме можно записать в виде

$$m_ч \times \vec{a} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = \vec{G} + \vec{F}_A + \vec{F} \quad (13)$$

где $m_ч$ – масса частицы; a – ускорение частицы; G – сила тяжести; F_A – сила Архимеда; F – аэродинамическая сила.

С учетом значимых сил, действующих на частицу и определяющих характер ее движения, записали дифференциальные уравнения движения частицы:

$$\left.\begin{aligned} m \times a_r &= F_r^{сопр} \\ m \times a_\phi &= F_ц^{сопр} \\ m \times a_z &= -mg + F_z^{сопр} \end{aligned}\right\} \text{ или } \left.\begin{aligned} a_r &= \ddot{r} - r \times \dot{\phi}^2 \\ a_\phi &= r \times \ddot{\phi} + 2\dot{r} \times \dot{\phi} \\ a_z &= \ddot{z} \end{aligned}\right\} \quad (14)$$

где $v_r = \dot{r}$, $v_\phi = r \times \dot{\phi}$, $v_z = \dot{z}$. (15)

Принимая во внимание указанные выше допущения, полагаем, что аэродисперсный поток движется в спиральном канале как твердое тело при винтовом движении с угловой скоростью ω и постоянной скоростью u_z. Тогда можно считать, что скорость воздуха в точке с координатами r, φ, z будет иметь следующие параметры: $u_r = 0$, $u_\varphi = r \times w$, u_z.

Записали выражения для относительной скорости воздуха $\vec{v}^{отн}$ в виде

$$v_r^{отн} = \dot{r}, \quad v_\phi^{отн} = r \times (\phi - \omega), \quad v_z^{отн} = \dot{z} - u_z. \quad (16)$$

В процессе движения сила аэродинамического сопротивления, действующая на частицу, уравновешена движущей силой, определяемой относительной скоростью $\vec{v}^{отн}$, и противоположна ей по направлению:

$$\vec{F}^{сопр} = -k_1 \times v_{отн}^2 \times \frac{\vec{v}_{отн}}{v_{отн}} = -k_1 \times v_{отн} \times \vec{v}_{отн} \quad (17)$$

где $v_{отн}$ – модуль относительной скорости частицы

$$v_{отн} = \sqrt{\dot{r}^2 + r^2(\dot{\phi} - \omega)^2 + (\dot{z} - u_z)^2} \quad (18)$$

k_1 – постоянный коэффициент, определяемый свойствами частиц, такими как масса и скорость витания:

$$k_1 = \frac{mg}{v_{вит}} \quad (19)$$

Преобразовали уравнение (14) к следующему виду:

$$\left.\begin{aligned} \ddot{r} &= r \times \dot{\phi}^2 - \frac{k_1}{m}\dot{r} \times v_{отн} \\ r\ddot{\phi} &= -2\dot{r}\dot{\phi} - \frac{k_1}{m} r(\dot{\phi} - \omega) \times v_{отн} \\ \ddot{z} &= -g - \frac{k_1}{m}(\dot{z} - u_z) \times v_{отн} \end{aligned}\right\} \quad (20)$$

Интегрируя уравнения (20) и вводя начальные условия, нашли уравнения движения частицы. Допустим, что частица в начальный момент времени при входе в первый виток криволинейного канала спирального сепаратора имела одинаковую скорость с потоком воздуха. Привели дифференциальные уравнения движения частицы в спиральном канале (21) к безразмерному виду, поделив каждое на $r_1\omega^2$

$$\left.\begin{aligned} \ddot{r} &= r(\dot{\phi} + 1)^2 - \tilde{k} \times \dot{r} \times v_{отн} \\ r\ddot{\phi} &= -2\dot{r}(\dot{\phi} + 1) - \tilde{k} r \dot{\phi} v_{отн} \\ \ddot{z} &= -\tilde{g}\tilde{k}(\dot{z} - \tilde{u}_z) \times v_{отн} \end{aligned}\right\} \quad (21)$$

где $v_{отн} = \sqrt{\dot{r}^2 + (r\dot{\phi})^2 + (\dot{z} - \tilde{u}_z)^2}$.

Безразмерные постоянные параметры определяются по формуле (22):

$$\begin{aligned} &\tilde{u}_z = u_z / (r_1\omega), \qquad \tilde{g} = g(r_1\omega^2) \\ &\tilde{k} = \tilde{g} / \tilde{v}_{вит}^2 \qquad \tilde{v}_{вит} = v_{вит} / (r_1\omega) \end{aligned} \quad (22)$$

где r_1 – радиус витка по внутренней поверхности трубки.

Получив ряд безразмерных параметров, включая коэффициент

$$\tilde{k}_v = \frac{g \times r_1}{v_{вит}^2},$$

и задавшись начальными условиями, дифференциальные уравнения (21) решались в специальной компьютерной программе Separator. Результаты расчетов представлены в виде графических зависимостей (рис. 2–3).

Значение коэффициента $\tilde{k}_v$ связано со скоростями витания частиц , которые определяются ее физико-механическими и аэродинамическими свойствами. Как эти параметры отличаются для частиц продуктов с различными системами видно из таблицы 1.

Траектории движения частиц, построенные в безразмерных координатах при постоянном параметре соотношения диаметра витков к радиусу и входной скорости, дают представление о характере движения частиц в рабочей зоне классификатора. На рисунке 2 можно видеть, что частицы продукта с первой драной системы, имеющие $\tilde{k}_v = 0{,}03$, при соответствующей ему скорости витания 5,5 м/с, оказываются раньше к поверхности оседания, чем частицы муки высшего сорта с параметрами $\tilde{k}_v = 0{,}98$ и 1 м/с соответственно.

На рисунке 3 приведен характер изменения радиальной координаты частиц, отличающихся скоростями

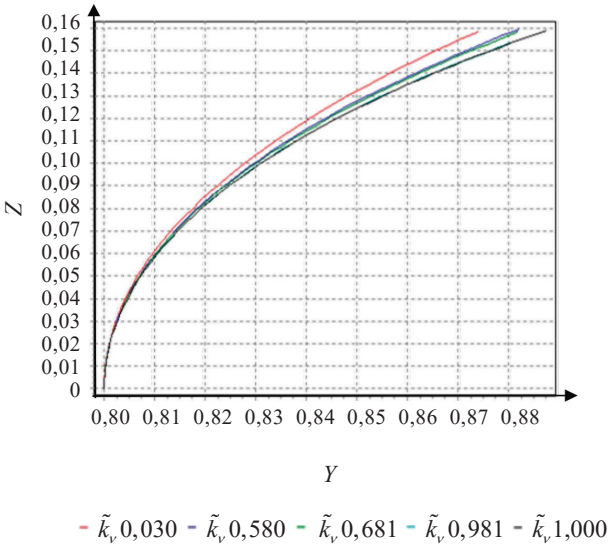

Рисунок 2. Траектории движения частиц в плоскости *YZ*

Figure 2. Particle trajectories, *YZ*

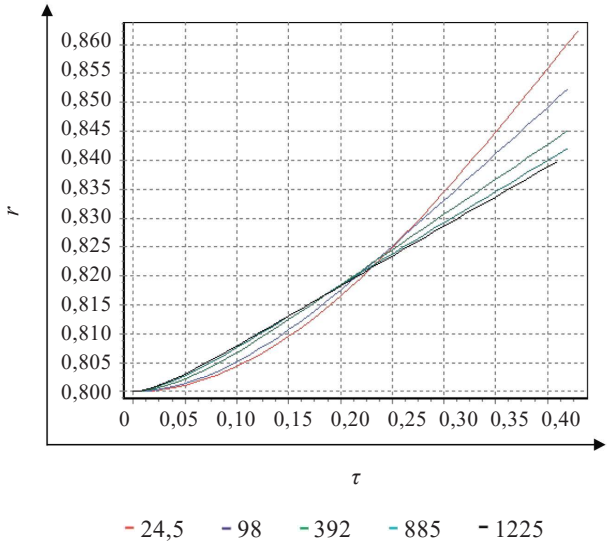

Рисунок 3. Изменение радиальной координаты от времени

Figure 3. Effect of processing time on radial coordinate

Таблица 1. Параметры продуктов размола зерна

Table 1. Parameters of grain milling products

№	Продукт	$v_{вит}$, м/с	$\tilde{k}_v$
1	Мука пшеничная в/с	1,00	0,981
2	Мука 1-го сорта	1,20	0,681
3	Мука 2-го сорта	1,30	0,580
4	I драная система	5,50	0,030
5	II драная система	3,80	0,070
6	III драная система	3,00	0,110
7	Первые размольные системы	1,80	0,300
8	Последние размольные системы	1,60	0,380
9	Высокобелковая фракция муки	0,05	392

витания, но имеющих тонкодисперсную структуру. Этот характер показывает теоретическую возможность делимости смеси даже для мелких частиц, которые не только характеризуются различной дисперсностью, но и обладают разной плотностью, а значит химическим составом.

Результаты моделирования процесса пневмоцентробежной классификации мелкодисперсных частиц в криволинейном канале спирального классификатора позволят создать устройства, которые имеют оптимальное соотношение размеров рабочей зоны классификатора и параметров воздушного потока, соответствующих физико-механическим свойствам частиц продуктов размола зерна, для создания условий их стабильного улавливания на соответствующем витке классификатора и вывода из рабочей зоны. Таким образом, в качестве оптимальных теоретических параметров процесса пневмоцентробежной классификации тонкодисперсных частиц в спиральном классификаторе-отделителе, предназначенном для разделения продуктов размола зерна на фракции и отделения дисперсной фазы от воздуха частиц с первой драной системы, наилучшим соотношением внутреннего диаметра витка к его радиусу ($d_{тр}$:r_1) является 1:8 при скорости движения потока 6,5 м/с. Для частиц со второй драной системы $d_{тр}$:r_1 соотношение составило 1:7, для частиц муки $d_{тр}$:r_1 = 1:4,5 при той же скорости воздушного потока.

Экспериментальные исследования процесса пневмоцентробежной классификации проводились на экспериментальной установке (рис. 4).

Экспериментальному исследованию были подвергнуты продукты размола зерна с различных драных систем, мука и полидисперсные смеси с соотношением масс частиц различной дисперсности, таких как мука, манная крупа и просо. Отдельно исследовали муку высшего сорта и продукты с драных и размольных систем.

Продукт подавался в загрузочное устройство (*2*) дозатора (*1*). Затем он подхватывался воздушным потоком и транспортировался в спиральный воздушный классификатор (*3*) для разделения на четыре фракции по своим физико-механическим и аэродинамическим показателям. Продукт, осевший на каждом витке в осадочных камерах (*4*), (*5*) и (*6*), взвешивали, определяли общую и пофракционную эффективность, а также подвергали анализу дисперсного состава на ситовом лабораторном классификаторе. При классификации муки определили состав фракций на содержание белка и крахмала.

Техническая характеристика спирального классификатора следующая: расход воздуха Q = 8,3–15 м^3/ч, входная скорость $V_{вх}$ = 1,5–12 м/с, потери давления $H_ц$ = 78,2–270,6 Па, коэффициент сопротивления: $\zeta_ц$ = 8,9.

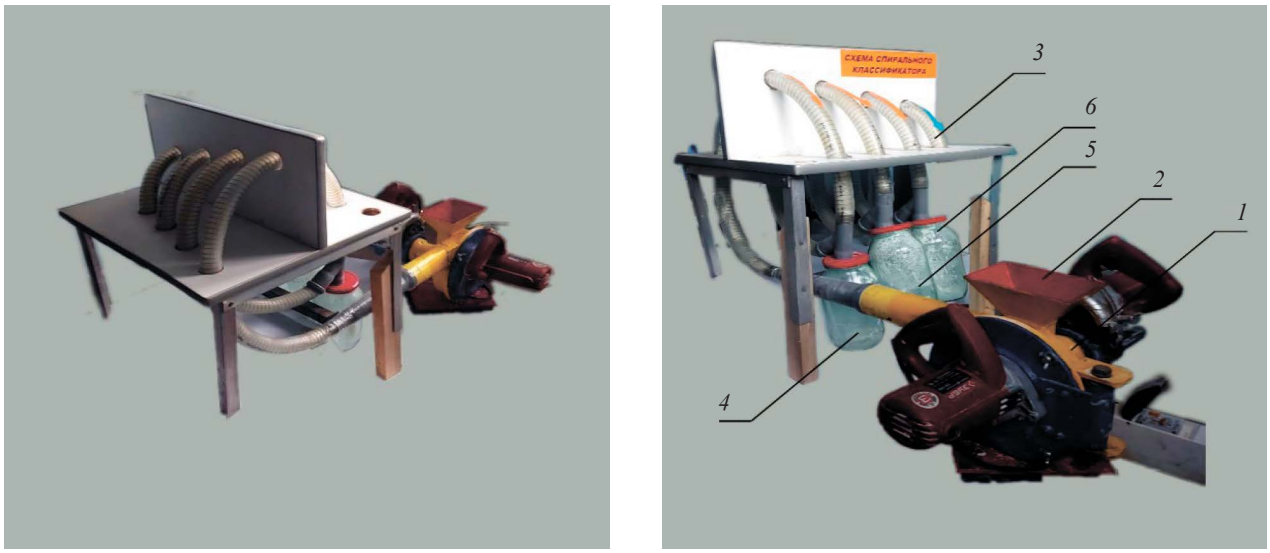

Рисунок 4. Экспериментальная установка: *1* – дозатор, *2* – загрузочное устройство, *3* – спиральный классификатор,*4–6* – осадочные камеры

Figure 4. Experimental separator: *1* – dispenser, *2* – loading device, *3* – spiral classifier, *4–6* – catch box

Таблица 2. Матрица эксперимента и результаты опыта

Table 2. Experiment matrix and results

Скорость воздушного протока на входе в классификатор (X_1), м/с	Концентрация аэросмеси (X_2), г/м^3	Эффективность отделения муки (Y_1), %									
1,5	5	78,0	79,0	78,9	78,9	78,8	78,1	78,0	72,9	72,9	73,0
2	7	81,0	82,9	88,0	86,3	89,0	83,6	80,8	72,1	73,1	74,0
3	8	82,0	83,0	84,3	98,2	99,1	84,5	83,5	84,8	85,3	85,1
4,2	9	82,0	82,8	84,2	99,0	99,2	98,8	97,7	95,9	97,9	95,4
5,4	10	82,3	82,7	84,1	85,1	99,0	95,1	97,3	97,9	87,6	86,7
6,6	12	82,2	82,6	83,0	94,3	98,0	95,1	97,7	88,4	87,2	86,8
7,8	14	82,4	82,5	82,5	83,0	84,2	85,2	87,2	87,3	86,9	86,7
8,0	16	83,0	82,5	82,3	83,0	84,1	75,1	76,8	77,2	76,6	76,6
9,2	18	82,2	82,5	82,2	82,0	83,0	74,9	76,9	86,9	75,9	75,2
12	20	80,3	70,1	75,0	72,0	72,5	75,0	76,3	76,6	75,0	75,1

Экспериментальные исследования были направлены на определение оптимальных режимов процесса пневмоклассификации и отделение дисперсной фазы от воздушного потока. Установили влияние на эффективность процесса таких факторов, как скорость воздушного потока и объемная концентрация продуктов размола. Для муки высшего сорта скорость воздушного потока варьировалась в пределах 1,5–12 м/с, концентрация аэросмеси от 0,87 до 1,27 кг/кг, расход транспортируемого материала от 11 до 21 кг/ч. Конструкция классификатора обеспечивала соотношение геометрических размеров витков классификатора в соответствии с найденными расчетным путем значениями для различных дисперсных частиц.

В таблице 2 представлены результаты расчетных значений общей эффективности отделения муки от воздуха в классификаторе в зависимости от скорости потока и концентрации аэросмеси.

По результатам эксперимента составили уравнение регрессии в виде полинома второй степени, которое включает члены, учитывающие эффект парного межфакторного взаимодействия. Для определения эффективности отделения муки в спиральном классификаторе получили зависимость (23) и поверхность отклика (рис. 5b):

$$Y = 49{,}52 + 15{,}96X_1 + 1{,}344X_2 - 2{,}448X_1^2 + \\ + 0{,}01X_2^2 + 0{,}04\,X_1X_2 \qquad (23)$$

Экспериментальные исследования подтверждают результаты математического моделирования, говоря о возможности разделения фракций муки и продуктов размола по комплексу физико-механических свойств: размер, плотность и аэродинамические свойства.

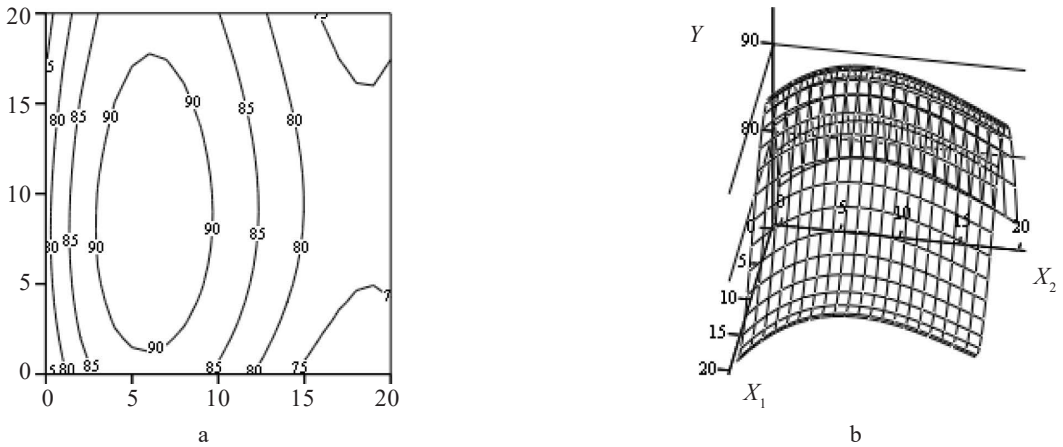

Рисунок 5. Графическое представление эффективности отделения муки в спиральном классификаторе, %: а) как карты линий равного уровня; b) как графика поверхности

Figure 5. Efficiency of flour separation in the spiral classifier, %: a) mapped same-level lines; b) surface graph

Выводы

Теоретические параметры, полученные математическим моделированием, а именно соотношение размеров внутреннего радиуса спирали к радиусу витка, легли в основу разработки конструкции лабораторного стенда. По результатам экспериментальных исследований, проведенных на спиральном классификаторе на муке и продуктах размола с различных драных и размольных систем при изменении скорости воздушного потока, получили следующие оптимальные конструктивные и технологические параметры: в диапазоне скоростей воздуха от 6 до 8 м/с на первом витке спирального классификатора с соотношением внутреннего радиуса витка к внутреннему диаметру трубы $r_1/d_{тр}$ = 7,9 отделяется фракция частиц с эквивалентным диаметром 450–630 мкм (крупная крупка). На втором витке при $r_1/d_{тр}$ = 7 отделяется фракция с размерами 315–450 мкм (средняя и мелкая крупка). На третьем витке при $r_1/d_{тр}$ = 6,25 отделяется фракция с размерами 160–315 мкм (дунсты и частично мука). На последующих витках при $r_1/d_{тр}$ < 5 отделяется фракция с размерами до 160 мкм, в том числе тонкие высокобелковые фракции муки с размерами частиц 17–20 мкм.

По данным экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы: на первом витке оседает около 80 % продукта, на втором около 12 % продукта, а на третьем около 8 % продукта. Максимальная эффективность отделения продукта с третьей размольной системы достигает 98 % при скорости на входе в спиральный пылеотделитель 6 м/с. Максимальная эффективность отделения муки высшего сорта достигает 99,2 % при скорости на входе в спиральный классификатор-пылеотделитель 4,2 м/с. Относительная концентрация μ изменялась в пределах от 0,87 до 1,27 кг/кг.

Качественное разделение муки высшего сорта на белковые и крахмальные фракции соответствует следующим оптимальным параметрам работы установки: пофракционная эффективность разделения варьировалась в пределах от 98 до 99 %, общая эффективность отделения дисперсной фазы от воздуха составила 99,2 %. Это соответствует входной скорости 4,2 м/с и концентрации 9 г/м^3.

В рамках дальнейших экспериментальных исследований представляет интерес изучение влияния на процесс классификации импульсного воздействия воздушного потока на дисперсный материал в пределах каждого отдельно взятого витка благодаря созданию регулируемого подсоса через осадочные бункера.

Полученные результаты подтверждают возможность использования классификатора для разделения продуктов измельчения на фракции по комплексу свойств с выделением высокобелковой фракции муки и отделением дисперсного продукта от воздушного потока как в качестве самостоятельного устройства, так и при работе в технологической схеме сортового помола зерна в муку на этапе работы сепараторов и разгрузчиков пневмотранспортных систем пищевых производств и предприятий по переработке сельскохозяйственной продукции.

Критерии авторства

О. Н. Терехова руководила проектом по теме исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

O.N. Terekhova supervised the project.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

References

1. Renzyaeva TV, Tuboltseva AS, Renzyaev AO. Various flours in pastry production technology. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(2):407–416. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2373

2. Gumerov TYu, Gafarova IA, Mingaleeva ZSh, Reshetnik OA. The food safety and quality of food products. Bezopasnost' Zhiznedeatel'nosti. 2022;257(5):3–9. (In Russ.). [Безопасность и качество пищевых продуктов / Т. Ю. Гумеров [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. 2022. Т. 257. № 5. С. 3–9.]. https://www.elibrary.ru/SCYBVR

3. Gumerov TYu, Mingaleeva ZSh, Reshetnik OA. Recipes development and evaluation of quality and safety indicators for cereal. Food Industry. 2022;7(1):70–81. (In Russ.). https://doi.org/10.29141/2500-1922-2022-7-1-9

4. Marjanović-Balaban Ž, Gojković Cvjetković V, Grujić R. Gliadin proteins from wheat flour: the optimal determination conditions by ELISA. Foods and Raw Materials. 2021;9(2):364–370. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-364-370

5. Faheid SMM, Rizk IRS, Kishk YFM, Ragab GH, Mostafa S. Carboxymethyl cellulose and psyllium husk in gluten-free pasta. Foods and Raw Materials. 2022;10(2):329–339. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-2-540

6. Prikhodko DV, Krasnoshtanova AA. Using casein and gluten protein fractions to obtain functional ingredients. Foods and Raw Materials. 2023;11(2):223–231. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-2-569

7. Terekhova ON, Glebov AA, Duyunova YaS. Fine air separation of dispersed particles in grain processing. Bulletin of Altai State Agricultural University. 2019;175(5):140–147. (In Russ.). [Терехова О. Н., Глебов А. А., Дуюнова Я. С. Тонкая воздушная сепарация дисперсных частиц в процессах переработки зерна // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. Т. 175. № 5. С. 140–147.]. https://elibrary.ru/KNRGUK

8. Terekhova ON. Pneumatic classification of grain grinding products. In: Anatskaya AS, Arganchieva DB, Akhmedov AT, Bardin VS, Belousov ON, Valiullina DM, *et al.*, editors. Innovative science: fundamental and applied issues. Petrozavodsk: New Science; 2021. pp. 330–352. (In Russ.). https://doi.org/10.46916/03122021-1-978-5-00174-392-7

9. Hosien M, Selim S. Effect of solid loading on the performance of gas-solids cyclone separators. Mansoura Engineering Journal. 2020;34(2):16–25. https://doi.org/10.21608/bfemu.2020.126001

10. Artikov A, Karabaev D, Abdujabborov SA. On the question of calculation of the number of particle turns in the field of centrifugal forces in the cycloning apparatus. AIP Conference Proceedings. 2022;2432(1). https://doi.org/10.1063/5.0090003

11. Dubov GA, Muratova KM, Makhnin AA, Chistyakov YaV, Ivanova VV, Chistyakov VA. Classifying dust collector. Russia patent RU 195513U1. 2020. [Пылеуловитель-классификатор: пат. 195513U1 Рос. Федерация. № 2019118139 / Дубов Г. А. [и др.]; заявл. 11.06.2019; опубл. 30.01.2020. Бюл. № 15. 1 с.].

12. Butenko AG, Smyk SYu. Technology combined cleaning polydisperse airflow. Industrial Ecology. 2014;88(4):37–41. (In Russ.). [Бутенко А. Г., Смык С. Ю. Технология комбинированной очистки полидисперсного воздушного потока // Экология промышленного производства. 2014. Т. 88. № 4. С. 37–41.]. https://elibrary.ru/TGTJBP

13. Pavlenko IV, Yukhymenko MP, Lytvynenko AV, Bocko J. Solving the nonstationary problem of the disperse phase concentration during the pneumoclassification process of mechanical mixtures. Journal of Engineering Sciences. 2019;6(1):F1–F5.

14. Slavyanskiy AA, Mitroshina DP, Gribkova VA, Karamzin AV. Fractionation of bulk food products. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(1):89–97. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-89-97

15. Semenov EV, Slavyanskii AA, Karamzin VA, Karamzin AV. Centrifugal fractionation of fine particles. Chemical and Petroleum Engineering. 2019;55(1–2):122–128. https://doi.org/10.1007/s10556-019-00591-z

16. Semenov EV, Slavyanskiy AA, Mitroshina DP. Quantitative analysis of suspension clarification process in inter-tray space of separator drum. Chemical and Petroleum Engineering. 2021;57(5–6):361–369. https://doi.org/10.1007/s10556-021-00944-7

17. Kim VA, Kashin YaM. Kopelevich LE. Characteristics of combined motor of separator drive. Journal of Physics: Conference Series. 2021;2096. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2096/1/012094

18. Morozov YuP, Penkov PM. Studying the possibilities of improving centrifugal separation efficiency. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal. 2020;(3):80–86. (In Russ.). https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-3-80-86

19. Zlochevskij VL, Terekhova ON. Method of separating fine particles from gas. Russia patent RU 2461410C1. 2012. [Способ отделения мелкодисперсных частиц от газовой среды: пат. 2461410C1 Рос. Федерация. № 2011122175/05 / Злочевский В. Л., Терехова О. Н.; заявл. 31.05.2011; опубл. 20.09.2012. Бюл. № 26. 8 с.].

20. Zhang L, Apea-Bah FB, Chen X, Hornung PS, Malunga LN, Beta T. The physicochemical and structural properties and in vitro digestibility of pea starch isolated from flour ground by milling and air classification. Food Chemistry. 2023;419. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136086

21. Andreev NR, Goldstein VG, Kovalenok VA, Nosovskaya LP, Adikaeva LV, Miroshnikov AA. Investigation of the process of extraction of a highly starchy fraction of rye flour by air classification. Agricultural Science Euro-North-East. 2021; 22(6):896–906. (In Russ.). https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.896-906

22. Lobanov VG, Roslyakov YuF, Ermakov AI, Zabolotets AA, Litvyak VV. Dry method of obtaining of native starch fractionated by size. Russia patent RU 2710788C1. 2020. [Способ получения сухим методом нативного фракционированного по размеру гранул крахмала: пат. 2710788C1 Рос. Федерация. № 2019122198 / Лобанов В. Г. [и др.]; заявл. 11.07.2019; опубл. 13.01.2020. Бюл. № 2. 8 с.].

23. Kandrokov RK, Tsybina GM, Budova AV. Pneumatic screen fractionation of barley and wheat flour for extraction of protein and carbohydrate fractions. Bread Products. 2022;(6):52–57. (In Russ.). https://doi.org/10.32462/0235-2508-2022-31-6-52-57

24. Lisitsyn AB, Chernukha IM, Nikitina MA. Russian methodology for designing multicomponent foods in retrospect. Foods and Raw Materials. 2020;8(1):2–11. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-1-2-11

25. Artikov AA, Karabaev DT. Computer simulation of particle velocity in a cyclone. Universum: Technical Sciences. 2023;110(5–1):34–40. (In Russ.). https://doi.org/10.32743/UniTech.2023.110.5.15434

26. Maslov AV, Biktagirova AI, Agzamova LI, Mingaleeva ZSh. Method application of generalized reduced gradient and fractional factor experiment in the composition optimization of the complex food additive for bread of increased nutritional value. Food Industry. 2021;6(3):5–14. (In Russ.). https://doi.org/10.29141/2500-1922-2021-6-3-1

27. Maslov AV, Mingaleeva ZSh, Yamashev TA, Shibaeva NF. Effect of a complex plant additive on flour mixes and wheat dough. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(3):511–525. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2385

28. Martsulevich NA, Flisyuk OM, Meshalkin VP, Garabadzhiu AV. Dispersed material classification in multi-section air classifier. ChemcChemTech. 2021;64(10):84–90. (In Russ.). https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216410.6455

29. Martsulevich NA, Flisyuk OM, Chirkunova UG. Fractionation of dispersed material in a two-part air classifier. Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University). 2020;79(53):61–64. (In Russ.). https://doi.org/10.36807/1998-9849-2020-53-79-61-64

30. Flisyuk OM, Toptalov VS, Martsulevich NA. Theoretical and experimental analysis of dependence of efficiency of direct-flow cyclone on geometry of separating chamber. ChemChemTech. 2021;64(8):99–106. (In Russ.). https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216408.6419

31. Bogdanov LN, Biryukov AYu, Afanas′eva SA-R, Belov NN, Ob″edkov AYu, Polyushko VA. Parameters of the air-centrifugal classification zone in a pneumatic circulation device and their effect on the process of separation of finely-dispersed material. Russian Physics Journal. 2013;56(9–3):21–23. (In Russ.). [Исследование параметров зоны воздушно-центробежной классификации в пневмоциркуляционном аппарате, существенно влияющих на процесс разделения тонкодисперсного материала / Л. Н. Богданов [и др.] // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 9–3. С. 21–23.]. https://elibrary.ru/SNVEJJ

32. Zlochevskiy VL, Mukhopad KA. Ecology and innovative development of gas cleaning. Industrial Ecology. 2019; 105(1):28–34. (In Russ.). [Злочевский В. Л., Мухопад К. А. Экология и инновационное развитие газоочистки // Экология промышленного производства. 2019. Т. 105. № 1. С. 28–34.]. https://elibrary.ru/YZZWMP