

УДК 631.3

UDC 631.3

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЛАССИФИКАТОРОВ ДЛЯ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЗЕРНОВЫХ ПОРОШКОВ**

### **USE OF CLASSIFIERS FOR FRACTIONATION OF FINE-GRAINED CEREAL POWDERS**

Вдовина Виктория Александровна  
Студент  
*Казанский государственный энергетический  
университет, Казань, Россия*

Vdovina Victoria Alexandrovna  
Student  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan,  
Russia*

Шинкевич Татьяна Олеговна  
Канд. техн. Наук, доцент  
SPIN – код автора: 9724-1390  
*Казанский государственный энергетический  
университет, Казань, Россия*

Shinkevich Tatyana Olegovna  
Cand.Tech.Sci., associate professor  
RSCI SPIN-code: 9724-1390  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan,  
Russia*

В статье описано значение классификаторов при переработке зерна, включая улучшение качества муки за счёт регулирования крупности и составного состава фракций, а также удаление нежелательных примесей. Проведён анализ актуальных научных исследований последних лет, посвящённых сухому фракционированию зерновых материалов – в частности, воздушной классификации и электростатическому разделению – с акцентом на получение высокоценных фракций (обогащённых белком, клетчаткой и др.). Показано, что применение современных классификаторов позволяет получать фракции муки с разным гранулометрическим составом и химическим составом, что используется для целевого улучшения свойств продуктов. Описаны основные принципы работы ситовых и аэродинамических классификаторов, а также новейшие инновационные подходы (например, трибоэлектрическое разделение) для сухого обогащения зерновых порошков. Приведены результаты исследований, демонстрирующие достижение значительного обогащения белка в муке зерновых и бобовых культур при помощи воздушной классификации, а также снижение содержания микотоксинов и тяжёлых металлов в продуктах за счёт отделения загрязнённых фракций. В заключение обобщаются перспективы использования классификаторов в зерновой отрасли для повышения эффективности переработки, получения функциональных ингредиентов и обеспечения качества и безопасности пищевых продуктов

The article examines modern technologies and equipment for classifying (fractionating) fine-grained powders in the grain sector of the agro-industrial complex. The significance of classifiers in grain processing is described, including improving flour quality by regulating particle size distribution and composition, as well as removing undesirable impurities. A review of recent scientific studies on dry fractionation of cereal materials—specifically, air classification and electrostatic separation—is conducted, with an emphasis on obtaining high-value fractions enriched with protein, fiber, and other beneficial components. It is demonstrated that the use of modern classifiers enables the production of flour fractions with varying granulometric and chemical compositions, which can be used to enhance product properties. The main principles of sieve and aerodynamic classifiers are outlined, along with the latest innovative approaches, such as triboelectric separation, for dry enrichment of cereal powders. Research findings are presented, showing significant protein enrichment in cereal and legume flours through air classification, as well as a reduction in mycotoxin and heavy metal content in products by separating contaminated fractions. Finally, the prospects for using classifiers in the grain industry to improve processing efficiency, obtain functional ingredients, and ensure the quality and safety of food products are summarized

Ключевые слова: КЛАССИФИКАЦИЯ;

Keywords: CLASSIFICATION; FRACTIONATION;

ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ; МЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ ПОРОШКИ; ЗЕРНОВАЯ ОТРАСЛЬ; ВОЗДУШНЫЙ КЛАССИФИКАТОР; СУХОЕ ОБОГАЩЕНИЕ; БЕЛКОВЫЕ КОНЦЕНТРАТЫ FINE-GRAINED POWDERS; GRAIN INDUSTRY; AIR CLASSIFIER; DRY ENRICHMENT; PROTEIN CONCENTRATES

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-207-049>

**Введение.** Классификаторы позволяют разделять зерновое сырьё и продукты его переработки на фракции по размеру или плотности частиц, что имеет ключевое значение для качества и эффективности переработки. На этапе после помола зерна классификация обеспечивает получение фракций муки требуемой крупности для разных видов продуктов (хлебопекарная мука, манная крупа, крахмалистые или отрубьяные фракции и т.д.). Кроме того, за счёт разделения по крупности можно отделять нежелательные примеси и оболочки зерна (отруби) от ценной эндоспермной части. Классификация мелкодисперсных порошков позволяет целенаправленно изменять состав продукта: так, тонкие фракции муки обычно богаты крахмалом, тогда как более грубые содержат больше белка и пищевых волокон. Это означает, что при расसेве или воздушной классификации муки образующиеся фракции отличаются не только размером частиц, но и химическим составом [1].

Таким образом, применение классификаторов открывает возможности для обогащения продуктов переработки зерна полезными компонентами (например, получение белково- или клетчатко-обогащённых фракций), а также для удаления избыточно мелких частиц пыли, влияющих на сыпучесть и технологические свойства. В целом классификаторы в зернопереработке служат для повышения однородности и качества муки, оптимизации технологических процессов и создания новых видов продуктов. В условиях растущих требований к качеству зерновых продуктов и стремления к безотходному использованию сырья роль классификаторов в отрасли постоянно возрастает.

<http://ej.kubagro.ru/2025/03/pdf/49.pdf>

**Состояние исследований и актуальность проблемы.** В последние 5–7 лет наблюдается повышенный интерес исследователей к технологиям сухого фракционирования зерновых материалов, позволяющим без применения воды и реагентов разделять муку на целевые фракции. Классическая помольная схема (роликовые мельницы) не обеспечивает разделения компонентов, тогда как добавление этапов классификации позволяет дифференцировать продукт по составу. Современные работы фокусируются на получении обогащённых фракций – прежде всего, высокобелковых или высококлетчаточных продуктов из зерна и зернобобовых. Так, сухое фракционирование (помол с последующей воздушной классификацией) успешно применяется для концентрирования растительного белка. Например, в экспериментальных условиях из муки гороха получают протеиновый концентрат с содержанием белка ~51–55% при выходе до 77%, тогда как традиционный влажный метод (экстракция и осаждение) даёт изолят с ~90% белка. Аналогично, из ячменя с исходным содержанием белка около 8% получены обогащённые белком фракции (~18% белка) методом воздушной классификации с добавлением динамических факторов. Эти результаты подтверждают эффективность классификаторов для обогащения муки ценными компонентами. Также активно изучаются комбинации методов: например, последовательное применение воздушного и электростатического разделения для повышения чистоты белковых и крахмальных фракций. Перспективной инновацией является трибоэлектрическая (электростатическая) сепарация муки – в работах сообщается о возможности регулировать содержание белка в пшеничной муке с её помощью. Хотя эффективность сухой электростатической сепарации пока уступает классическим методам (в одном исследовании эффективность разделения составляла ~47%), её развитие идёт быстрыми темпами. Обзорных работ показывают, что разделение муки на мелкие и крупные фракции существенно изменяет её

реологические и питательные свойства, что необходимо учитывать при разработке продуктов [2]. Актуальной остаётся и проблема безопасности: недавние исследования продемонстрировали, что с помощью обновлённых схем помола с микронизацией и классификацией можно снижать содержание микотоксинов и тяжёлых металлов в зернопереработке. В частности, при переработке твёрдой пшеницы использование воздушного классификатора позволило сконцентрировать микотоксины и As, Cd, Pb в отрубях, получив малообработанные продукты (например, цельнозерновую муку) с уровнем загрязнителей, сопоставимым с манной крупой. Таким образом, современные исследования подтверждают актуальность совершенствования классификаторов для решения одновременно технологических и пищевых задач – от повышения питательной ценности зерновых продуктов до обеспечения их безопасности.

**Цель исследований.** Целью данной обзорной работы является анализ современных методов и оборудования для классификации мелкодисперсных зерновых материалов, обобщение результатов новейших исследований в этой области и оценка перспектив применения классификаторов в зерновой отрасли. Особое внимание уделено технологиям сухого фракционирования (воздушным и механическим классификаторам, электростатическим сепараторам) и их роли в получении фракций с заданными свойствами и составом.

**Материалы и методы исследований.** В ходе работы проведён аналитический обзор научной литературы (статьи в журналах Scopus Q1–Q2 за 2018–2024 гг.), посвящённой технологиям фракционирования зерновых продуктов. Основное внимание уделено описанию технических средств классификации мелкодисперсных порошков и принципам их функционирования. К ключевым технологиям относятся механическая классификация посредством сит и грохотов, аэродинамическая

классификация в потоке воздуха, а также методы сухого сепарирования по физико-химическим свойствам частиц (например, по электрическому заряду). Ситовые классификаторы (рассевы) традиционно используются на мельницах для разделения измельчённого зерна по размерам частиц. Многоярусные вибрационные сита позволяют выделять фракции различной крупности – от крупных крупок и манки до тончайшей муки. Воздушные классификаторы применяют аэродинамические силы: частицы увлекаются потоком воздуха, и по-разному крупные (или плотные) частицы разделяются под действием силы тяги воздуха и силы тяжести. Существуют гравитационные аэроклассификаторы (например, шахтные или зигзагообразные колонны), где частицы разделяются при нисходящем/восходящем движении в извилистом канале, а также центробежные (роторные) классификаторы, в которых вращающийся ротор создает вихревой поток: мелкие частицы выносятся воздушным потоком, тогда как крупные отбрасываются к стенкам под действием центробежной силы. Путём регулирования скорости воздуха или частоты вращения ротора устанавливают *граничный размер отсеки* – минимальный размер частицы, которая ещё выводится из классификатора с потоком воздуха. Аэродинамические классификаторы способны эффективно отделять частицы размером от десятков микрон, обеспечивая высокую производительность и относительно узкое распределение по размеру. Для очень тонких порошков (менее ~20–30 мкм), где силы межчастичного сцепления велики, могут применяться специальные приёмы – например, введение потоков вторичного воздуха, ультразвуковая активация или добавка инертных «разрыхляющих» агентов, предотвращающих агломерацию частиц. Электростатические классификаторы – новая группа аппаратов, используемых преимущественно в исследовательских целях для разделения пищевых порошков. Их принцип основан на различии в электрической зарядке

частиц разного состава: частицы протеина и крахмала в муке получают разный заряд при трении (трибоэлектрический эффект) и затем отклоняются в электрическом поле на разные электроды. Это позволяет отделять белковые частицы от крахмальных без воды и химических реагентов. Методологически работа опирается на сравнительный анализ данных о производительности, селективности разделения и качестве получаемых фракций в разных исследованиях.

**Результаты исследований.** Анализ научных публикаций показывает, что технологии классификации в зерновой отрасли достигли значительных успехов и продолжают совершенствоваться. Одно из важных достижений – создание сухих процессов получения белковых концентратов из зерна и бобовых. Воздушная классификация в сочетании с тонким помолом позволила получать фракции муки, обогащённые белком в 2–3 раза по сравнению с исходным сырьём. В случае пшеницы ещё ранние исследования показали возможность разделить муку на “лёгкую” крахмалистую и «тяжёлую» белково-отрубную фракции. Новейшие работы развивают этот подход: например, при фракционировании гороховой муки сухим методом получены белковые концентраты (>50% протеина), приближающиеся по содержанию белка к традиционным изолятам, но без применения воды. Для зерновых культур (пшеницы, ячменя) воздушная классификация также успешно применяется: так, из побочного продукта помола ячменя была получена фракция с повышенным содержанием белка (~18%), пригодная для последующего использования в пищевых продуктах. Другим направлением инноваций стало обогащение пищевых волокон и биологически активных веществ. Сухое фракционирование отрубей пшеницы позволяет сконцентрировать в лёгкой фракции ценные компоненты (например, антиоксиданты,  $\beta$ -глюкан) и повысить их биодоступность в конечных продуктах. Это открывает путь к созданию функциональных ингредиентов из побочных продуктов зерна.

Отделение части оболочек и экстремально мелких частиц ведёт к снижению содержания в муке некоторых загрязнителей. Например, использование воздушного классификатора после микронизации зерна твёрдой пшеницы позволило существенно снизить концентрацию микотоксинов DON и Т-2/HT-2 в пищевой фракции по сравнению с исходным сырьём. Получаемые “условно цельнозерновые” продукты имели содержание токсинов на уровне продуктов из очищенного эндосперма, что минимизирует риск для потребителя. Ещё один прогресс – интеграция классификаторов непосредственно в помольное оборудование. Появились промышленные мельницы с воздушной классификацией, способные за один этап измельчать зерно и сразу же отделять тонкую фракцию требуемой дисперсности. Такое оборудование повышает эффективность производства тонких сортов муки, специй, кормовых добавок. Математическое моделирование и CFD-анализ воздушных потоков в классификаторах позволяют оптимизировать конструкцию (например, геометрию лопаток ротора или форму классификационной камеры) для достижения более резкого разделения частиц по размеру. Проводятся исследования по многоступенчатому фракционированию: было показано, что повторная классификация либо комбинированное применение воздушного и электростатического методов способны довести концентрацию белка в продукте до более высоких значений, чем одностадийная схема. Практической инновацией является использование *трибоэлектрических сепараторов* в линии помола: хотя пока они не обеспечивают полной очистки по белку, их включение как дополнительной стадии уже позволяет тонко регулировать состав муки (например, частично обезбогатить её клейковиной для специальных сортов продуктов). Таким образом, современные достижения в области классификации зерновых порошков охватывают как создание нового оборудования, так и разработку комбинированных технологических схем.

Эти инновации направлены на более полное и рациональное использование зернового сырья: получение нескольких ценных фракций из одного вида сырья (крахмалистой, белковой, богатой клетчаткой и т.д.) без отходов и с минимальными затратами.

**Выводы.** Обобщая рассмотренные данные, можно заключить, что классификаторы являются неотъемлемой частью современных технологий переработки зерна. Их использование повышает эффективность технологических процессов – от очистки зерна до тонкого помола – обеспечивая получение продуктов с заданными свойствами. Классификация мелкодисперсных порошков позволяет создавать новые виды ингредиентов (белковые концентраты, диетические волокна из отрубей и пр.), расширяя ассортимент и ценность зерновой продукции. Современные достижения в области классификаторов (повышение точности воздушных сепараторов, внедрение электростатических методов, многоступенчатое фракционирование) открывают перспективы для мягкого (безреагентного) разделения компонентов зерна непосредственно в мукомольных производствах.

#### Библиографический список

1. Assatory A., Vitelli M., Rajabzadeh A.R., Legge R.L. Dry fractionation methods for plant protein, starch and fiber enrichment: a review // *Trends in Food Science & Technology*. 2019. 86: 340–351. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.02.006.
2. Petit P.-A., Bernet N., Baylou P., et al. The throat classifier: a novel air classifier for the control of dust in manufactured sands // *Powder Technology*. 2021. 390: 417–426. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.05.049.

#### References

1. Assatory A., Vitelli M., Rajabzadeh A.R., Legge R.L. Dry fractionation methods for plant protein, starch and fiber enrichment: a review // *Trends in Food Science & Technology*. 2019. 86: 340–351. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.02.006.
2. Petit P.-A., Bernet N., Baylou P., et al. The throat classifier: a novel air classifier for the control of dust in manufactured sands // *Powder Technology*. 2021. 390: 417–426. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.05.049.