

УДК 681.12

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ В МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ СИСТЕМЕ ВОЗДУШНЫХ КЛАССИФИКАТОРОВ ПОСЛЕ ДРОБИЛКИ**

Шарипов Ильнар Ильдарович  
Канд. техн. наук  
SPIN – код автора: 8046-8265  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Сабиров Булат Миннефаилевич  
Старший преподаватель  
SPIN – код автора: 6798-6347  
*Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия*

Чернова Олеся Станиславовна  
Студент  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

В современных агропромышленных процессах важной задачей является повышение эффективности переработки сырья и минимизация потерь при его обработке. Одной из ключевых технологий, направленных на улучшение качества продукции, является воздушная классификация частиц, особенно в сочетании с дробильными установками. Актуальность данной темы обусловлена необходимостью более точного разделения частиц после дробления, что позволяет значительно повысить выход продукта и его качество. В статье представлены результаты численного моделирования работы многоступенчатой системы воздушных классификаторов, предназначенной для разделения частиц после дробилки. Исследования проводились с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent для анализа поведения частиц размером от 5 до 100 мкм в воздушном потоке со скоростями 12 м/с и 16 м/с. Рассматривались конфигурации системы с двумя, тремя и четырьмя последовательно соединенными классификаторами. Результаты показали, что увеличение числа классификаторов значительно повышает эффективность разделения частиц, особенно для мелкодисперсных фракций. Система с 4 классификаторами продемонстрировала наибольшую эффективность, достигая 99% для частиц размером более 40 мкм и до 90% для частиц менее 20 мкм при скорости 16 м/с. Внедрение

UDC 681.12

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

**INVESTIGATION OF PARTICLE SEPARATION EFFICIENCY IN A MULTI-STAGE AIR CLASSIFIER SYSTEM FOLLOWING A CRUSHER**

Sharipov Inar Ildarovich  
Cand.Tech.Sci.  
RSCI SPIN-code: 8046-8265  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Sabirov Bulat Minnefailevich  
Senior lecturer  
RSCI SPIN – code: 6798-6347  
*Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia*

Chernova Olesia Stanislavovna  
Student  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

In modern agro-industrial processes, one of the key challenges is improving the efficiency of raw material processing and minimizing losses during treatment. One of the crucial technologies aimed at enhancing product quality is air particle classification, particularly in combination with crushing equipment. The relevance of this topic is due to the need for more precise particle separation after crushing, which significantly increases product yield and quality. This paper presents the results of numerical modeling of a multi-stage air classifier system designed for particle separation following a crusher. The study was conducted using ANSYS Fluent software to analyze the behavior of particles ranging from 5 to 100 microns in an airflow with velocities of 12 m/s and 16 m/s. Configurations with two, three, and four sequentially connected classifiers were considered. The results showed that increasing the number of classifiers significantly improves particle separation efficiency, especially for fine fractions. The system with four classifiers demonstrated the highest efficiency, reaching 99% for particles larger than 40 microns and up to 90% for particles smaller than 20 microns at a velocity of 16 m/s. The implementation of multi-stage air classification systems can significantly enhance the productivity and quality of raw material processing in the agro-industrial complex, especially for tasks related to separating particles of various sizes

многоступенчатых систем воздушной классификации может существенно повысить производительность и качество переработки сырья в агропромышленном комплексе, особенно для задач, связанных с разделением частиц различных фракций

Ключевые слова: ВОЗДУШНЫЙ КЛАССИФИКАТОР, ДРОБИЛКА, МНОГОСТУПЕНЧАТАЯ СИСТЕМА, КЛАССИФИКАЦИЯ ЧАСТИЦ, МЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ, ANSYS FLUENT, АГРОПРОМЫШЛЕННОСТЬ, РАЗДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ, СКОРОСТЬ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Keywords: AIR CLASSIFIER, CRUSHER, MULTI-STAGE SYSTEM, PARTICLE CLASSIFICATION, FINE PARTICLES, ANSYS FLUENT, AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX, PARTICLE SEPARATION, AIRFLOW VELOCITY

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-203-008>

**Введение.** Эффективная переработка сельскохозяйственного сырья в агропромышленном комплексе требует применения современных технологий для снижения затрат и повышения качества конечного продукта. Одним из важнейших этапов обработки зерновых культур является их дробление и последующее разделение частиц по размерам, что напрямую влияет на качество готового сырья. Дробление зерна является первым шагом, позволяющим уменьшить размер исходного материала и подготовить его для дальнейших процессов, однако без точного разделения измельчённых частиц можно столкнуться с потерей качественного продукта. Здесь на помощь приходит технология воздушной классификации, которая используется для эффективного разделения частиц по их размерам и плотности.

Воздушные классификаторы позволяют значительно повысить точность отделения мелких частиц от крупных фракций, что делает их незаменимыми в технологической линии после дробления. После того, как дробильное оборудование переработало зерно, остаётся задача отделить наиболее мелкие фракции, которые могут быть потеряны или неравномерно распределены при традиционных методах сепарации. Особенно это актуально при работе с частицами размером менее 100 мкм, где точность играет ключевую роль в повышении выхода качественного

<http://ej.kubagro.ru/2024/09/pdf/08.pdf>

продукта. Внедрение таких систем позволяет не только улучшить качество переработки, но и сократить потери сырья.

Использование дробилок и классификаторов в единой технологической линии становится всё более актуальным в условиях растущего спроса на более совершенные методы переработки сырья. Интеграция этих двух процессов в одном производственном цикле оптимизирует затраты на оборудование и эксплуатацию, а также сокращает временные издержки. Воздушные классификаторы являются одним из ключевых решений для таких задач, помогая не только разделить частицы, но и улучшить общее качество продукции, повысить её стандарты и уменьшить затраты на очистку и доработку продукта.

**Состояние исследований и актуальность проблемы.** На протяжении последних десятилетий вопросы точного дробления и разделения частиц привлекали внимание исследователей в агропромышленном секторе. Традиционные методы сепарации частиц, такие как вибрационные сита или центробежные сепараторы, часто не справляются с задачами тонкого разделения частиц мелкой фракции, особенно если речь идёт о частицах с граничным размером в районе 40 мкм. Это создаёт необходимость разработки более эффективных решений для отделения частиц на этапах переработки сельскохозяйственного сырья. Использование дробилок в сочетании с высокоточными классификаторами способно значительно улучшить производительность перерабатывающих предприятий.

В последние годы было предложено множество различных подходов к созданию комбинированных технологических систем, где дробление и классификация частиц выполняются в рамках одного технологического процесса. Это позволяет не только ускорить обработку сырья, но и сократить потребности в использовании нескольких отдельных устройств, что снижает затраты на энергию и эксплуатацию. Более того, исследования

показывают, что классификация частиц с использованием воздушных потоков позволяет точно отделить тонкодисперсные фракции от более крупных частиц, что невозможно достичь с помощью стандартных сепараторов. Воздушные классификаторы, работающие с граничным размером 40 мкм, обеспечивают именно такой уровень точности.

Применение воздушных классификаторов после дробилок для разделения мелких частиц уже доказало свою эффективность в ряде промышленных экспериментов. Эти устройства используют аэродинамические свойства частиц и воздушные потоки для достижения нужной точности. В агропромышленном комплексе это особенно важно, так как мелкие частицы не только ухудшают качество продукции, но и могут стать причиной загрязнения оборудования и создания неблагоприятных условий на производстве. Таким образом, развитие и внедрение технологий, которые способны одновременно дробить зерно и точно отделять частицы разного размера, является важнейшей задачей для дальнейшего развития отрасли.

Для эффективного разделения твердых мелкодисперсных частиц предлагается использовать несколько последовательно соединенных центробежных воздушных классификаторов (рис. 1).



Рисунок 1 – Последовательно соединенные центробежные воздушные классификаторы

В пространстве между трубами создается система завихрений. В результате действия которой крупные частицы сепарируются из газа и падают в бункер, далее поступают в дробилку. Мелкие частицы продолжают дальнейшее движение и выходят из классификаторов. После чего поступают в батарейные циклоны, в которых улавливаются, представляя собой конечный продукт [1].

**Цель исследований.** Оценить эффективность разделения твердых частиц в трех последовательно соединенных классификаторах.

**Материалы и методы исследований.** Для проведения исследований была создана модель одного воздушного классификатора. Численные исследования проводились с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent, что позволило провести моделирование движения частиц в воздушных потоках с различными скоростями. Размер частиц варьировался в диапазоне от 5 до 100 мкм, что дало возможность оценить эффективность классификатора  $E$  для разделения мелкодисперсных фракций. Основным параметром, который использовался для оценки эффективности работы системы из нескольких классификаторов  $E_k$ , выражался формулой:

$$E_k = E - (1 - E)^k, \quad (1)$$

где  $k$  – количество последовательно соединенных классификаторов.

Для исследований были рассмотрены два уровня скорости воздушного потока: 12 и 16 м/с. Эти параметры были выбраны для моделирования различных условий работы классификатора, от спокойных до более турбулентных режимов. Моделирование позволило проанализировать изменение траекторий частиц при варьировании скорости и выявить оптимальные параметры для различных типов сырья. Кроме того, было проведено моделирование работы системы с различным количеством классификаторов – 2, 3 и 4 устройства, что позволило

определить их влияние на общий результат разделения и оценить эффективность каждого конфигурационного решения.

**Результаты исследований.** В ходе численных исследований были изучены три различных конфигурации классификаторов: системы с двумя, тремя и четырьмя последовательно соединенными аппаратами. Результаты для каждого случая показывают заметное влияние как скорости воздушного потока, так и количества классификаторов на эффективность разделения частиц.

При использовании системы с двумя классификаторами получено, что эффективность разделения частиц размером менее 30 мкм остается ниже 50% при скорости 12 м/с. Для мелкодисперсных частиц (5-20 мкм) эффективность была особенно низкой, что связано с недостаточной мощностью воздушных завихрений для их эффективного отделения. Для частиц размером 40 мкм и более, эффективность отделения значительно выше – порядка 85-99%. Это указывает на то, что система с двумя классификаторами эффективно справляется с разделением более крупных фракций, но требует доработки для мелких частиц (рис. 2).

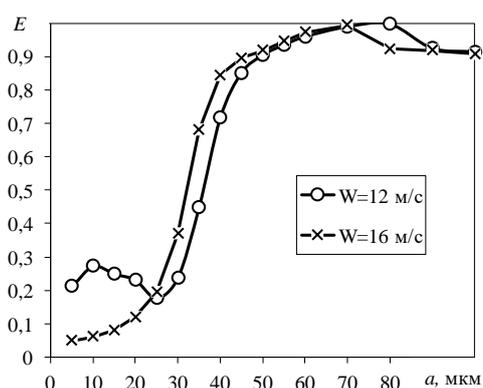


Рисунок 2 – Эффективность двух последовательно соединенных классификаторов

При увеличении скорости воздушного потока до 16 м/с наблюдается некоторое улучшение для мелких частиц, однако эффективность для частиц среднего размера (20-25 мкм) снижается. Это связано с турбулентными процессами, которые возникают при более высокой

скорости, что приводит к нарушению стабильных траекторий частиц и снижению эффективности классификации для определенных диапазонов размеров.

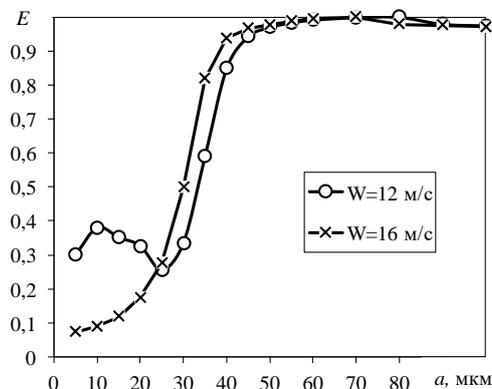


Рисунок 3 – Эффективность трех последовательно соединенных классификаторов

Система с тремя классификаторами продемонстрировала значительное улучшение в сравнении с двухступенчатой системой. Для частиц размером 40 мкм и более эффективность достигает 97-99% как при скорости 12 м/с, так и при 16 м/с. Это подтверждает, что такая система наиболее подходит для обработки крупных частиц, обеспечивая их точное разделение (рис. 3).

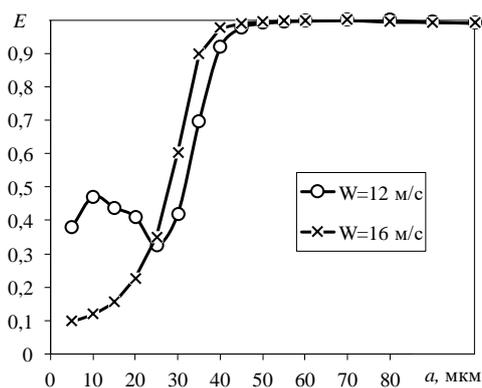


Рисунок 4 – Эффективность четырех последовательно соединенных классификаторов

Наиболее высокая эффективность разделения наблюдается при использовании системы с четырьмя классификаторами. Для всех размеров частиц, начиная с 40 мкм и более, эффективность составляет порядка 99%

при обеих скоростях воздушного потока (12 м/с и 16 м/с). Особенно заметное улучшение наблюдается для мелкодисперсных частиц размером 5-20 мкм, где эффективность достигает 60-90% при скорости 16 м/с. Это указывает на то, что система с 4 классификаторами способна обеспечивать высокую степень разделения даже для самых мелких фракций, что невозможно было достичь в системах с меньшим количеством классификаторов (рис. 4).

**Выводы.** 1. Увеличение количества классификаторов до четырёх повышает эффективность разделения частиц, особенно мелкодисперсных (до 90% при 16 м/с для частиц менее 20 мкм). 2. Более высокая скорость воздушного потока (16 м/с) улучшает разделение мелких частиц. 3. Многоступенчатые системы классификации повышают качество разделения частиц и могут эффективно использоваться для оптимизации переработки сырья в агропромышленном секторе.

#### Библиографический список

1. Зинуров, В. Э. Промышленные испытания фракционирования сыпучего материала в мультивихревом классификаторе-сепараторе / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева, К. С. Моисеева // Вестник Технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 4. – С. 58-63.

#### References

1. Zinurov, V. Je. Promyshlennye ispytaniya frakcionirovanija sypučego materiala v mul'tivihrevom klassifikatore-separatore / V. Je. Zinurov, A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva, K. S. Moiseeva // Vestnik Tehnologičeskogo universiteta. – 2022. – T. 25. – № 4. – S. 58-63.