

# ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 631.363.21

DOI: 10.53083/1996-4277-2022-214-8-90-95

В.В. Садов, С.А. Сорокин

V.V. Sadov, S.A. Sorokin

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ЗЕРНА С ПНЕВМОЗАБОРОМ

### INCREASING PERFORMANCE OF GRAIN GRINDERS WITH PNEUMATIC INTAKE

**Ключевые слова:** пневматический измельчитель, конструкция ротора, воздушный поток, пневмозабор, энергоёмкость процесса, лопасти вентилятора.

Большое разнообразие измельчителей для зерна позволяет получить различные компоновки технологических схем для производства комбикормов. Особое место занимают пневматические измельчители, характеризующиеся большим расходом воздуха и невысокой производительностью, в связи с этим высокой удельной энергоёмкостью процесса. В основном используются двухкамерные измельчители, обладающие к тому же повышенной материалоемкостью. На основании теоретических исследований разработана модель измельчителя с однокамерной конструкцией для повышения эксплуатационных характеристик: снижения энергоёмкости и материалоемкости. С данной конструкцией были произведены опытные испытания. В качестве основных направлений модернизации конструкции были следующие: совмещение лопастей вентилятора и ротора, что дает снижение подвижной массы машины; камеру измельчения выполнили в виде многогранника, что способствует созданию зон завихрения для эффективного извлечения из камеры измельченных частиц; отверстия выполнили продолговатые, длинной осью по образующей многогранника, для увеличения проходного сечения, но при этом обеспечивается зоотехнический размер частиц при движении материала поперек отверстий. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что увеличение количества транспортируемого зернового материала в воздухе приводит к снижению энергоёмкости процесса. Совмещение конструкции ротора и вентилятора позволило получить энергоёмкость процесса по сравнению с серийно выпускаемыми при соблюдении зоотехнических

требований по модулю помола. Также значительно снизилась материалоемкость конструкции.

**Keywords:** pneumatic grinder, rotor design, air flow, pneumatic intake, energy intensity of process, fan blades.

A wide variety of grain grinders allows obtaining different layouts of technological schemes for the production of animal feeds. A special place is held by pneumatic grinders characterized by high air consumption and low productivity, in connection with this, a high specific energy intensity of the process. Two-chamber grinders are mainly used; they are also material-intensive. Based on theoretical studies, a grinder model with a single-chamber design was developed to improve performance: reduce energy and material consumption. This design underwent experimental testing. The main directions of the design modernization were as follows: combining the fan blades and the rotor which would reduce the moving mass of the machine; the grinding chamber was made in the form of a polyhedron which would contribute to the creation of swirl zones for efficient extraction of crushed particles from the chamber; the holes were made oblong with a long axis along the generatrix of the polyhedron to increase the flow area but at the same time the animal industry size of the particles was ensured when the material moved across the holes. Theoretical and experimental studies have shown that increased amount of transported grain material in the air leads to decreased energy intensity of the process. The combination of the rotor and fan design made it possible to obtain the energy intensity of the process as compared to series-produced ones subject to the animal industry requirements for the fineness modulus. Also, the material consumption of the structure decreased significantly.

**Садов Виктор Викторович**, д.т.н., ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: sadov.80@mail.ru.

**Сорокин Сергей Анатольевич**, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, e-mail: sorokin\_sg@mail.ru.

**Sadov Viktor Viktorovich**, Dr. Tech. Sci., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: sadov.80@mail.ru.

**Sorokin Sergey Anatolyevich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: sorokin\_sg@mail.ru.

### Введение

Совершенствование измельчителей зерновых материалов в большинстве случаев направлено на оптимизацию эксплуатационных показателей: удельную энергоёмкость процесса, материалоемкость, выравненность гранулометрического состава и др. Конструктивные отличия и организация технологического процесса в измельчителях существенно влияют на эти показатели. Однако не всегда производитель обращает внимание на их величину, а решает задачу по обеспечению функционирования производства. Известно, что измельчители с пневмозабором имеют более высокую удельную энергоёмкость в отличие от машин с механической или гравитационной подачей материала. Измельчители с пневмозабором применяют для снижения количества стационарного транспортного оборудования в хозяйстве. Данные конструкции обеспечивают подачу материала в измельчитель и удаление измельченных частиц за счет движения воздуха, создаваемого вентилятором в дробилке [1, 2].

**Цель** исследования – исследовать возможность качественного повышения эксплуатационных показателей пневматических измельчителей.

### Объекты и методы исследований

Измельчители зерновых материалов с пневмозабором занимают свою нишу в сельскохозяйственных предприятиях, где отсутствуют комбикормовые агрегаты или размольные установки с механической подачей материала. В

большинстве случаев набор элементов у двухкамерных измельчителей у разных производителей будет схож (рис. 1).

Наиболее важные элементы пневматического измельчителя – ротор с пакетами свободноповешенных молотков и вентилятор. Такая конструкция материалоемка и энергоёмка. Например, дробилка ДВР-7,5 имеет удельную энергоёмкость 9,5 кВт·ч/т и удельную материалоемкость 225 кг/т [3].

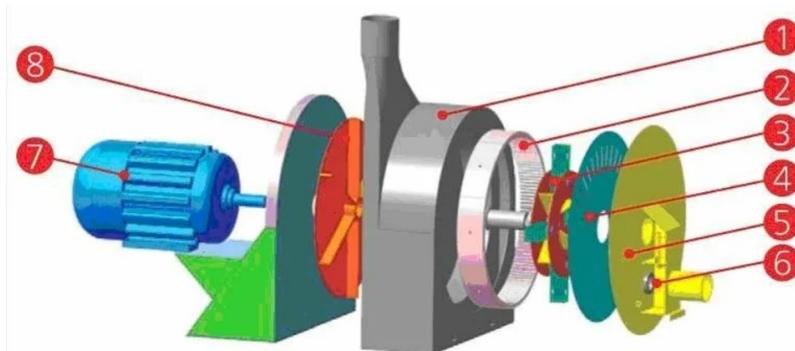
### Результаты исследования

При работе пневматического измельчителя значительная часть энергии расходуется на прокачивание воздуха через машину, что и снижает привлекательность их использования [4]. Для достижения цели была смоделирована новая конструкция измельчителя, позволяющая улучшить эксплуатационные показатели. Для этого применили следующие шаги:

1) совместили лопасти вентилятора и измельчающие элементы, что дало снижение подвижной массы машины;

2) камеру измельчения выполнили в виде многогранника, что способствует созданию зон завихрения для эффективного извлечения из камеры измельченных частиц;

3) отверстия выполнили продолговатые, длинной осью по образующей многогранника, для увеличения проходного сечения, но при этом обеспечивается зоотехнический размер частиц при движении поперек отверстий.



**Рис. 1.** Существующая конструкция пневматической дробилки:

1 – корпус; 2 – дека; 3 – ротор; 4 – жалюзи; 5 – крышка; 6 – магнит; 7 – двигатель; 8 – вентилятор

Лопасты выполнены наклоненными под углом к образующей для обеспечения максимальной абсолютной скорости схода материала [5]. Предлагаемая конструкция представлена на рисунках 2-4.

Проведем расчет количества энергии, потраченной измельчителем в выражении всей электрической мощности, потребленной двигателем по транспортировке зернового материала и его измельчению.

Мощность привода измельчителя с пневмозабором расходуется на создание разности давлений в заборном и выходном патрубках и энергии, затраченной на разрушение материала. Мощность при этом будет равна:

$$N = N_{\text{разр}} + N_{\text{возд}}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{разр}}$  – мощность, расходуемая на разрушение материала, кВт;

$N_{\text{возд}}$  – мощность, расходуемая на задание движения воздушного потока с зерновым материалом, кВт.

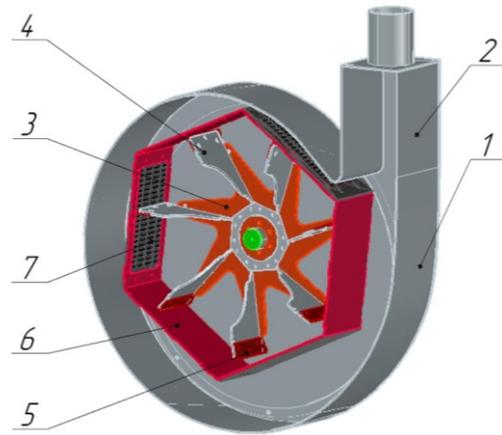
Энергия воздушного потока, отнесенная к единице времени, потребляемая ротором измельчителя на создание разности давлений  $\Delta P$  при перемещении зерна из бурта к рабочим органам дробилки и подъему дерти в бункер после измельчения, найдется по уравнению:

$$N_{\text{возд}} = \frac{Q \cdot \Delta P}{1000 \cdot \eta}, \quad (2)$$

где  $Q$  – производительность по воздуху, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta P$  – разность давлений при полном напоре во всасывающем и выходном патрубках, Па;

$\eta$  – коэффициент полезного действия лопаток ротора по созданию направленной энергии движения воздушного потока.



**Рис. 2. Модель пневматического измельчителя:**  
 1 – корпус измельчителя;  
 2 – выводной патрубок; 3 – диск ротора;  
 4 – лопасть; 5 – лопатка;  
 6 – камера измельчения; 7 – решето

Объемная производительность

$$Q = S \cdot V_{\text{в}}, \quad (3)$$

где  $S$  – площадь сечения патрубка, м<sup>2</sup>;

$V_{\text{в}}$  – скорость воздушного потока, м/с.

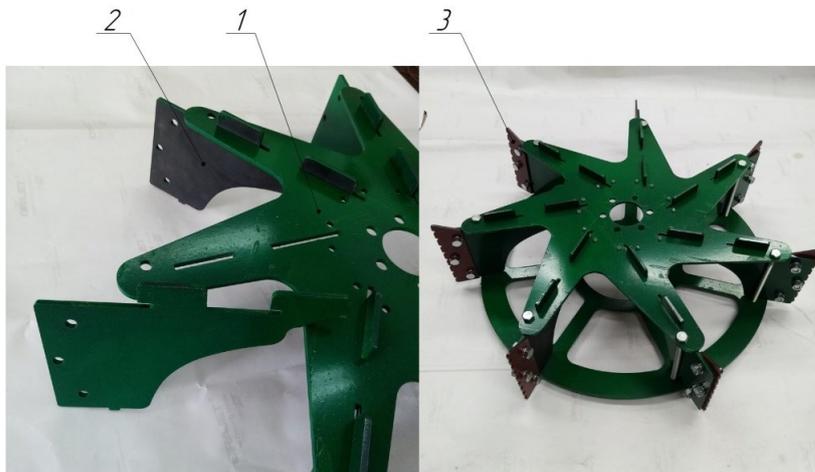
Воздушный поток имеет следующие характеристики: динамическое давление  $H_{\text{д}}$ , Па; статическое давление  $H_{\text{ст}}$ , Па; полное давление  $H$ , Па.

Скорость воздушного потока связана с динамическим давлением  $H_{\text{д}}$  (напором) и определяет кинетическую энергию движущейся воздушно-зерновой смеси. Кинетическую энергию описывают зависимостью

$$E = \frac{m \cdot v^2}{2}, \quad (4)$$

где  $m$  – масса объема, кг;

$V$  – скорость движущегося объема, м/с.



**Рис. 3. Ротор пневматического измельчителя:**  
 1 – диск ротора; 2 – лопасть; 3 – лопатка



Рис. 4. Общий вид измельчителя (без боковой крышки)

Так, по аналогии имеем, что кинетическая энергия объема воздушно-зерновой смеси численно равна динамическому напору, т.е. давлению в сечении патрубков или полостях камеры измельчения [6, 7]:

$$H_g = \frac{m_{вс} \cdot V_{вс}^2}{2}, \quad (5)$$

где  $m_{вс}$  - масса объема в  $1 \text{ м}^3$  движущейся смеси, то есть плотность, тогда  $m_{вс} = \rho_{вс}$ .

При нормальных условиях (температура  $20^\circ\text{C}$ , атмосферное давление  $101 \cdot 10^4 \text{ Па}$  и плотность воздуха  $1,2 \text{ кг/м}^3$ ) воздушно-зерновая смесь в измельчителе будет иметь плотность больше плотности воздуха на величину содержания в этом объеме зерна.

Работа пневматического измельчителя в нормальном режиме протекает при содержании зерна в объеме транспортирующего его воздуха  $\rho_z$ , находящегося в пределах  $1,6\text{-}6 \text{ кг/м}^3$ . Для этого диапазона найдем общую плотность воздушно-зерновой смеси:

$$\rho_{вс} = \rho + \rho_z. \quad (6)$$

Тогда, учитывая вес воздуха и содержание зерна, имеем значение плотности  $\rho_{вс}$  от  $2,5\text{-}7,2 \text{ кг/м}^3$ .

Из уравнения (5) найдем  $V_{вс}$  с учетом  $m_{вс} = \rho_{вс}$ :

$$V_{вс} = \sqrt{\frac{2 \cdot H_g}{\rho_{вс}}}. \quad (7)$$

Скорость воздушно-зерновой смеси оказывается в пределах

$$V_{вс} = (0,89 \div 0,53) \sqrt{H_g}. \quad (8)$$

Измеряя динамическое давление выходного патрубка, зная площадь его поперечного сечения, по выражениям (2), (3) и (8) найдем мощность  $N_{возд}$ , расходуемую приводом на перемещение воздушно-зерновой смеси в бункер-накопитель измельченного зерна.

Для нашей конструкции дробилки:  $\Delta P = 130 \text{ мм вод. ст.} = 1274 \text{ Па}$ ;  $S = 0,01 \text{ м}^2$ ;  $V_{вс} = (0,89 \dots 0,53)$ ;  $\sqrt{H_g} = (23 \dots 14) \text{ м/с}$ ;  $\eta = 0,2$  (ротор с наклонными в сторону движения лопатками имеет закрытым 50% периметра, поэтому в два раза уменьшаем значение КПД, учитывая, что для подобных роторов  $\eta = 0,4\text{-}0,7$ ) [6, 8]:

$$N_{возд} = \frac{S \cdot V_{вс} \cdot \Delta P}{1000 \cdot \eta} = 1,49 \div 0,9 \text{ кВт.}$$

При увеличении загрузки измельчителя скорость воздушного потока уменьшается, и потребляемая процессом пневмотранспортировки мощность снижается с 1,49 до 0,9 кВт.

Проведенные опыты дали результат: при малой загрузке  $50 \text{ кг/ч}$  скорость воздушно-зерновой смеси  $23 \text{ м/с}$ , потребляемая электродвигателем мощность  $2,7 \text{ кВт}$ ; при номинальной загрузке  $592 \text{ кг/ч}$  скорость воздушно-зерновой смеси  $14 \text{ м/с}$ , потребляемая электродвигателем мощность  $4,02 \text{ кВт}$ . Данные сняты с асинхронного

трехфазного электродвигателя 5АИ100L2 мощностью 5,5 кВт.

Мощность, расходуемая на измельчение продукта при номинальной нагрузке двигателя, найдем из (1):

$$N_{\text{разр}} = N - N_{\text{возд}} = 4,02 - 0,9 = 3,13 \text{ кВт.}$$

Расход энергии на измельчение 1 т зерна составил 11,2 кВт·ч.

Полный расход энергии с учетом измельчения и пневмотранспортировки продукта в бункер, находящийся на высоте 2,5 м от уровня забора зерна, из бурта составил 6,75 кВт·ч/т. При этом модуль помола составила 1,8 мм, а материалоемкость конструкции – 145 кг/т.

### Выводы

1. Применение совмещенной конструкции ротора и вентилятора на пневматическом измельчителе позволяет снизить энергоемкость, материалоемкость и сложность конструкции.

2. Загрузка измельчителя приводит к изменению скорости воздушного потока, который в свою очередь значительно влияет на энергоемкость процесса. Увеличение подачи материала от 1,6 до 6 кг/м<sup>3</sup> приводит к снижению потребляемой мощности процесса пневмотранспортировки с 1,49 до 0,9 кВт.

3. Совмещение конструкции ротора и вентилятора позволило получить энергоемкость процесса 6,75 кВт·ч/т при модуле помола 1,8 мм. Материалоемкость конструкции составила 145 кг/т.

### Библиографический список

1. Анализ влияния конструктивных факторов и результатов исследования аэродинамических характеристик вентилятора дробилки ДКР-3 / Н. Ф. Баранов, В. С. Фуфачев, А. Г. Сергеев, С. Ю. Булатов. – Текст: непосредственный // Техника и оборудование для села. – 2007. – № 12. – С. 33-34.

2. Яровский, А. А. Исследования вентиляционных свойств комбинированного ротора молотковой дробилки / А. А. Яровский, Н. И. Клименко, Ф. С. Кирпичников. – Текст: непосредственный // Механизация сельскохозяйственного производства: научные труды УСХА. – Киев, 1974. – Вып. 59. – С. 24-27. – Текст: непосредственный.

3. Аграрные технологии и машины: [сайт]. – URL: <https://agrotm.org/products/drobilki-pnevmo>

(дата обращения: 18.04.2022). – Текст: Изображение: электронные.

4. Мельников, С. В. Аэродинамические исследования молотковых кормодробилок / С. В. Мельников. – Текст: непосредственный // Земледельческая механика: сборник трудов. – Москва: Машиностроение, 1971. – Т. 13. – С. 270-281.

5. Садов, В. В. Исследование траектории движения зернового материала при сходе с лопаток различной кривизны / В. В. Садов, С. А. Сорокин. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2019. – № 7 (177). – С. 152-158.

6. Босой, Б. С. Теория, конструкция и расчет сельскохозяйственных машин / Б. С. Босой, О. В. Верняев, И. И. Смирнов. – Москва: Машиностроение, 1978. – 567 с. – Текст: непосредственный.

7. Долгов, И. А. Уборочные сельскохозяйственные машины / И. А. Долгов. – Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2004. – 725 с. – Текст: непосредственный.

8. Вишняков, А. С. Обоснование технологических параметров рабочих органов зерноочистительных машин: учебное пособие / А. С. Вишняков, М. В. Богиня, О. В. Лисунов; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2017. – 100 с. – Текст: непосредственный.

### References

1. Baranov N.F. Analiz vliianiia konstruktivnykh faktorov i rezultatov issledovaniia aerodinamicheskikh kharakteristik ventilatora drobilki DKR-3 / N.F. Baranov, B.C. Fufachev, A.G. Sergeev, S.Iu. Bulatov // Tekhnika i oborudovanie dlia sela. – 2007. – No. 12. – S. 33-34.

2. Iarovskii A.A. Issledovaniia ventilatsionnykh svoistv kombinirovannogo rotora molotkovoii drobilki / A.A.Iarovskii, N.I. Klimenko, F.S. Kirpichnikov // Mekhanizatsiia selskokhoziaistvennogo proizvodstva: Nauch. tr. USKhA. – Kiev, 1974. – Vyp. 59. – S. 24-27.

3. Agrarnye tekhnologii i mashiny [sait] – URL: <https://agrotm.org/products/drobilki-pnevmo> (data obrashcheniia 18.04.2022).

4. Melnikov S.V. Aerodinamicheskie issledovaniia molotkovykh kormodrobilok // Zemledelcheskaia mekhanika: Sb. tr. – Moskva: Mashinostroenie, 1971. – T. 13. – S. 270-281.

5. Sadov V.V., Sorokin S.A. Issledovanie traektorii dvizheniia zernovogo materiala pri skhode s lopatok razlichnoi krivizny // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2019. – No. 7 (177). – S. 152-158.

6. Bosoi, B.S. Teoriia, konstruktsiia i raschet selskokhoziaistvennykh mashin / B.S. Bosoi, O.V. Verniaev, I.I. Smirnov. – Moskva: Mashinostroenie, 1978. – 567 s.

7. Dolgov, I.A. Uborochnye selskokhoziaistvennye mashiny / I.A. Dolgov. – Krasnoarsk: Izd-vo KrasGAU, 2004. – 725 s.

8. Vishniakov, A.S. Obosnovanie tekhnologicheskikh parametrov rabochikh organov zernoochistitelnykh mashin: ucheb.posobie / A.S. Vishniakov, M.V. Boginia, O.V. Lisunov; Krasnoiar. gos. agrar. un-t. – Krasnoarsk, 2017. – 100 s.



УДК 621.922.02

DOI: 10.53083/1996-4277-2022-214-8-95-101

Н.С. Алексеев, А.С. Шевченко, С.В. Иванов

N.S. Alekseev, A.S. Shevchenko, S.V. Ivanov

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШЛИФОВАНИЯ МИКРОПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ ПО КРИТЕРИЮ ШЕРОХОВАТОСТИ

### DETERMINING OPTIMAL PARAMETERS FOR GRINDING OF MICROPOROUS COATINGS IN TERMS OF ROUGHNESS INDEX

**Ключевые слова:** микропористые покрытия, абразивная обработка, шлифовальный круг, шероховатость, режимы резания, оптимизация, математическая модель.

При круглом наружном шлифовании шеек валов автомобилей, тракторов, сельскохозяйственной и дорожно-строительной техники, восстановленных различными способами газотермического напыления, возникают проблемы, связанные с интенсивным засаливанием и низкой стойкостью кругов, а также резким ухудшением шероховатости обработанной поверхности. Основная причина этих тенденций кроется в особенностях физико-механических свойств покрытий – высокая пористость, наличие оксидов и шлаков, повышенная адгезионная и химическая активность и т.д. В статье отмечается, что одним из направлений повышения эффективности врезного шлифования покрытий и достижения высоких технико-экономических показателей является оптимизация абразивной обработки. В работе приведены результаты оптимизации процесса круглого врез-

ного шлифования микропористых покрытий на никелевой основе. Сформирован комплекс параметров, необходимых для решения задачи оптимизации шлифовальной операции по критерию шероховатости. Разработана система технических ограничений для оптимизации режимов резания и элементов характеристики абразивных кругов. Рассмотрены вопросы достижения минимальной шероховатости обработанных поверхностей при обеспечении заданных технологических параметров шлифования. Разработана математическая модель процесса абразивной обработки как неотъемлемая часть оптимизационной задачи. Оптимизация целевой функции (шероховатости поверхности) осуществлялась при помощи метода линейного программирования. Определены оптимальные марки по зернистости и твердости шлифовальных кругов, обеспечивающие наименьшую шероховатость обработанной поверхности. Предлагаемая методика может использоваться для определения оптимальных параметров при шлифовании микропористых покрытий различных восстанавливаемых деталей, например, шеек коленчатых