

Научная статья

УДК 631:363.001.05

doi: 10.28983/asj.y2023i4pp106-111

Анализ процесса регулирования режимов измельчителя зерна на ступенчато-роторном измельчителе

Аббас Закир Ибрагимов, Намин Фуад Абдиева

Азербайджанский государственный аграрный университет, г. Гянджа, Республика Азербайджан

e-mail: a_ibragimov1995@mail.ru

Аннотация. Одной из главных проблем отраслей современной зерноперерабатывающей промышленности, включая мукомольное, крупяное и комбикормовое производство является их очень высокая энергоёмкость. Для достижения высоких экономических показателей в животноводческой отрасли кормовой рацион должен содержать определенный набор веществ, полностью удовлетворяющий потребности организма животного в питательных веществах. Поэтому производство комбикормов является важной отраслью сельского хозяйства. Регулирование степени измельчения фуражного зерна на роторных измельчителях можно изменением угловой скорости роторов. Целью работы было проведение теоретического анализа и практическая проверка процесса регулирования степени измельчения зерна путем регулирования угловой скорости роторов. При выборе схемы регулирования электропривода были учтены такие факторы, как конструкция установки, мощность привода, диапазон регулирования, физико-механические свойства измельчаемого материала. Для двухроторных измельчителей существует два варианта технологического процесса. При одинаковых скоростях роторов в зависимости от конструктивных параметров установки потребляемая мощность малого ротора составляет 60...80 % мощности большого. Для улучшения использования двигателей привода измельчителя следует одновременно регулировать угловую скорость одного привода и производительность установки таким образом, чтобы мощность на втором двигателе оставалась постоянной.

Ключевые слова: измельчитель зерна; степень измельчения; ротор; угловая скорость; производительность; диапазон регулирования.

Для цитирования: Ибрагимов А. З., Абдиева Н. Ф. Анализ процесса регулирования режимов измельчителя зерна на ступенчато-роторном измельчителе // Аграрный научный журнал. 2023. № 4. С. 106–111. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i4pp106-111>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Results of studies on the sealing of crop residues of leguminous crops with ploughshares

Abbas Z. Ibrahimov, Namid F. Abdieva

Azerbaijan State Agrarian University, Gyandzha, Azerbaijan Republic.

e-mail: a_ibragimov1995@mail.ru

Abstract. One of the main problems of the branches of the modern grain processing industry, including milling, cereal and feed production, is their very high energy intensity. In order to achieve high economic indicators in the livestock industry, the feed ration must contain a certain set of substances that fully meets the needs of the animal's body in nutrients. This is possible by preparing full-fledged compound feeds. Therefore, the production of compound feeds is an important branch of agriculture. Regulation of the degree of grinding of feed grain on rotary grinders can be done by changing the angular velocity of the rotors. The purpose of this work was to conduct a theoretical analysis and practical verification of the process of regulating the degree of grain grinding by regulating the angular velocity of the rotors. When choosing the control scheme of the electric drive, factors such as the structure of the installation, drive power, control range, physical and mechanical properties of the crushed material were taken into account. For two-rotor shredders, there are two variants of the technological process. At the same rotor speeds, depending on the structural parameters of the installation, the power consumption of a small rotor is 60... 80% of the power of a large one. To improve the use of the chopper drive motors, the angular



velocity of one drive and the plant performance should be adjusted simultaneously so that the power on the second engine remains constant.

Keywords: grain shredder; degree of grinding; rotor; angular velocity; productivity; control range.

For citation: Ibrahimov A. Z., Abdieva N. F. Analysis of the process of regulation of grain shredder modes on a step-rotary shredder // *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2023;(4):106–111. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i4pp106-111>.

Введение. Эффективность измельчения фуражного зерна во многом зависит от правильного выбора конструкции измельчителя и регулирования степени измельчения материала [1]. Большой интерес у хозяйств вызывают дезинтеграторные установки. Регулировать степень измельчения материала на этой установке можно изменением угловой скорости роторов. Проведённые нами исследования периодики, а также принципов работы машин, предназначенных для измельчения целого зерна, показали, что все они обладают значительной энергоёмкостью, что обусловлено применением в их принципе действия таких высокоэнергоёмких способов измельчения зерна, как сжатие и истирание. Прочная кормовая база является основой развития животноводства и птицеводства. Известно, что в рецептуре комбикормов для животных и птицы зерновые продукты занимают основное место, причем для большинства комбикормов наличие лузги (оболочки) зерна отрицательно влияет на эффективность их усвоения. Измельчение зерна связано со значительными затратами из-за недостаточной эффективности широко применяющихся молотковых дробилок, имеющих существенные недостатки, устранение которых является важнейшей задачей. Причем серийные дробилки обеспечивают только измельчение зерна. Удаление оболочки и мелкой фракции в процессе дробления компонентов комбикорма не производится, так как до настоящего времени оборудования для получения дробленых кормов из неголозерного зерна (например, ячменя) с одновременным снятием и удалением оболочки из массы размола нет. Это может быть обеспечено разработкой новых дробильно-шелушильных измельчителей непрерывного действия с вертикальной осью вращения ротора. Использование удара ограничено крупностью и качеством получаемого готового продукта, а скалывание реализовано только в дисковых мельницах и дробилках, в данный момент не нашедших широкого применения на предприятиях современной зерноперерабатывающей промышленности. Возможно несколько путей регулирования: изменение угловой скорости обоих роторов, только большого или только малого. Однако этот вопрос мало освещен в литературе в теоретическом и практическом плане. В настоящее время около 70 % всех энергетических затрат зерноперерабатывающей промышленности приходится именно на процесс измельчения зерна, а это в свою очередь составляет приблизительно 50 % экономических затрат на его переработку. Проведённый анализ литературы и работы почвообрабатывающих машин, а также различного оборудования, используемого в горнорудной промышленности, показал, что в них широко используется принцип резания-скалывания, то есть разрушения клином. Попытки перенести эту идею на процесс разрушения зерна без достаточного научного обоснования до сих пор не привели к созданию эффективных измельчителей зерна, основанных на данном способе разрушения. Ответственной и энергоёмкой технологической операцией в приготовлении комбикормов является измельчение зерна. За счет измельчения ингредиентов увеличивается площадь поверхности зернового материала, улучшается взаимодействие корма с пищеварительными ферментами, снижается энергоёмкость продукции и повышается качество смешивания компонентов. Однако тонкое измельчение увеличивает энергетические затраты, а мучнистые компоненты вызывают заболевания животных, особенно свиней. Измельчение занимает 50 % от общих энерго- и трудозатрат в приготовлении комбикормов. На животноводческих фермах, комбикормовых заводах, перерабатывающих предприятиях широко используются молотковые и ударно-центробежные дробилки и измельчители, имеющие ряд существующих недостатков. При тонком измельчении содержание пылевидной фракции составляет до 30 %, при грубом получается до 20 % недоизмельченной фракции. Это приводит к повышению энергоёмкости процесса измельчения и ухудшению качества готового продукта [2].

Цель данной работы – проведение теоретического анализа процесса с изучением задачи регулирования степени измельчения фуражного зерна.

Методика исследований. При выборе схемы регулирования электропривода необходимо учитывать следующие факторы: конструкцию установки, мощность приводов роторов, диапазон регулирования, физико-механические свойства измельчаемого материала [2– 4]. Существуют два варианта вышеуказанных конструкций измельчителей. У первого варианта (закрытого типа)



кинетическая энергия материала, полученная от последнего пальцевого ряда, используется для транспортирования его на заданное расстояние [5–7]. У второго варианта (открытого типа) материал после прохождения последнего ряда просыпается вниз. У первого варианта можно регулировать угловую скорость только малого ротора без нарушения режима выгрузки материала, у второго – угловую скорость обоих роторов. При выборе схемы регулирования степени измельчения установки второго типа следует исходить из условия минимальной регулируемой мощности.

Результаты исследований. Для определения мощности двигателей измельчителя при дроблении фуражного зерна наиболее приемлемы формулы [8, 9]:

$$N_I = k_I k_{II} Q \sum_{i=1}^n (D_{i-1} n_2 + D_i n_1) \cdot D_i n_1; \quad (1)$$

$$N_{II} = k_I k_{II} Q \sum_{i=1}^n (D_{i-1} n_1 + D_i n_2) \cdot D_i n_2; \quad (2)$$

где N_I и N_{II} – соответственно мощность малого и большого роторов, кВт; k_p , k_2 – коэффициенты, учитывающие конструктивные свойства установки и измельчаемого материала; Q – производительность установки, кг/с; n_p , n_2 – частота вращения малого и большого ротора, с⁻¹; D_i – расчетные диаметры пальцевых рядов, м.

Запишем выражение для определения мощности, идущей на измельчение, в зависимости от угловых скоростей и производительности:

$$N_I = Q k_I (a_I \omega_I \omega_{II} + \omega_I^2); \quad (3)$$

$$N_{II} = Q k_{II} (a_{II} \omega_I \omega_{II} + \omega_{II}^2); \quad (4)$$

где $k_I = k_1 k_2 \sum_{2m-1}^{n-1} D_i^2$; $k_{II} = k_1 k_2 \sum_{2m}^n D_i^2$; $a_I = \sum_{2m-1}^{n-1} D_{i-1} / \sum_{2m-1}^{n-1} D_i$; $a_{II} = \sum_{2m-1}^n D_{i-1} / \sum_{2m-1}^n D_i$ – конструктивные коэффициенты; ω_p , ω_{II} – угловые скорости роторов; m – порядковый номер пальцевого ряда; n – число рядов.

Обычно диаметр роторов установки принимают исходя из условия:

$$D_i = D_1 + \Delta D (i - 1); \quad (5)$$

где D_1 – расчетный диаметр первого пальцевого ряда, м; ΔD – расстояние между соседними пальцевыми рядами, м; i – номер пальцевого ряда.

Учитывая условие (5), можно получить зависимость для определения конструктивных коэффициентов:

$$a_I = \sum_{2m-1}^{n-1} [D_1 + \Delta D (i - 2)] / \sum_{2m-1}^{n-1} [D_1 + \Delta D (i - 1)] = n - 2/n; \quad (6)$$

$$a_{II} = \sum_{2m}^n [(D_1 + \Delta D (i - 2))] / \sum_{2m}^n [(D_1 + \Delta D (i - 1))] = 1 - \Delta D / (2D_1 + \Delta D n); \quad (7)$$

$$k_I / k_{II} = \sum_{2m-1}^{n-1} [1 + \Delta D (i - 1) / D_1]^2 / \sum_{2m}^n [1 + \Delta D (i - 1) / D_1]^2; \quad (8)$$

Воспользовавшись формулами (3) и (4), можно рассчитать распределение мощности между роторами:

$$\frac{N_I}{N_{II}} = \frac{k_I \omega_I (a_I \omega_{II} + \omega_I)}{k_{II} \omega_{II} (a_{II} \omega_I + \omega_{II})}. \quad (9)$$

Если угловые скорости равны, то

$$\frac{N_I}{N_{II}} = \frac{k_I (a_I + 1)}{k_{II} (a_{II} + 1)}. \quad (10)$$

Расчеты показывают, что на коэффициент a_{II} число рядов n и отношение $D_1 / \Delta D$ оказывают незначительное влияние, которым можно пренебречь. Тогда для расчета можно принять, что $a_{II} = 0,9$.

При одинаковых угловых скоростях роторов в зависимости от конструктивных параметров установки потребляемая мощность малого ротора составляет 60...80 % мощности большого.

При регулировании угловой скорости одного ротора мощность его привода возрастает пропорционально квадрату угловой скорости. Следовательно, обеспечить полную нагрузку обеих



двигателей при регулировании угловой скорости одного ротора и изменении производительности установки невозможно.

Для улучшения использования двигателей привода измельчителя следует одновременно регулировать угловую скорость одного привода и производительность установки таким образом, чтобы мощность на втором двигателе оставалась постоянной, то есть:

$$Q k_{II} (a_{II} \omega_I \omega_{II} + \omega_{II})^2 = Q_H k_{II} (a_{II} \omega_{IH} \omega_{II} + \omega_{II})^2; \quad (11)$$

$$Q = Q_H \frac{a_{II} \omega_{IH} + \omega_{II}}{a_{II} \omega_I + \omega_{II}}, \quad (12)$$

где Q_H – номинальная производительность, кг/с.

Подставляя выражение (11) в (3), получим уравнение для определения потребляемой мощности малого ротора при постоянной большого:

$$N_I = Q_H \frac{k_I (a_{II} \omega_{IH} + \omega_{II})}{a_{II} \omega_I + \omega_{II}} (a_I \omega_I \omega_{II} + \omega_I^2). \quad (13)$$

Возможные пределы регулирования угловой скорости можно получить из следующего условия:

$$Q_H k_I = \frac{a_{II} \omega_{IH} + \omega_{II}}{a_{II} \omega_I + \omega_{II}} (a_I \omega_I \omega_{II} + \omega_I^2) > Q_H k_I (a_I \omega_{IH} \omega_{II} + \omega_{IH})^2. \quad (14)$$

После решения (14) относительно угловой скорости малого ротора получим:

$$\omega_I = \omega_{IH}; \quad (15)$$

$$\omega_{II}'' = -\frac{a_I \omega_{II} + \omega_{IH}}{a_{II} \omega_I + \omega_{II}}. \quad (16)$$

Чтобы мощность на валу двигателя не превышала номинального значения, угловая скорость малого ротора должна находиться в пределах

$$-\omega_{II} \frac{a_I \omega_{II} + \omega_{IH}}{a_{II} \omega_I + \omega_{II}} > \omega_I \leq \omega_{IH}. \quad (17)$$

Полностью использовать мощность электроприводов можно только при регулировании угловой скорости обоих роторов. При этом производительность установки должен изменяться следующим образом:

$$Q = Q_H \frac{a_I \omega_{IH} \omega_{II} + \omega_{IH}^2}{a_I \omega_I \omega_{II} + \omega_I^2} = Q_H \frac{a_{II} \omega_{IH} \omega_{II} + \omega_{IH}^2}{a_{II} \omega_I \omega_{II} + \omega_{II}^2}. \quad (18)$$

При $\omega_I = \omega_{II}$.

Принимая в выражении (18) $\omega_{IH} = \omega_{IHH}$, получим:

$$Q = Q_H \frac{\omega_H^2}{\omega_I^2} \quad (19)$$

Из выражения (19) видно, что производительность установки ограничивается пропускной способностью первого пальцевого ряда.

При выборе схемы изменения степени измельчения следует исходить из условия наименьшей регулируемой мощности привода. Максимальная регулируемая мощность будет тогда, когда регулируется скорость обоих роторов. При изменении скорости одного ротора выбор схемы зависит от диапазона регулирования.

Диапазон изменения угловой скорости малого ротора может быть определен из выражений (3) и (4) при условии, что мощность, потребляемая этим ротором, будет меньше, чем большой:

$$k_I (a_I \omega_I \omega_{II} + \omega_I^2) < k_{II} (a_{II} \omega_I \omega_{II} + \omega_I^2). \quad (20)$$



Необходимый диапазон регулирования угловой скорости зависит от требуемого модуля помола. При дроблении фуражного зерна этот диапазон определяется с учетом зоотехнических требований на комбикорм.

Крупность размола (крупный, средний и мелкий) зерна устанавливается в зависимости от вида и возраста животных.

Согласно стандарту [10] степень помола определяется следующим образом:

$$M = \frac{0,5q_0 + 1,5q_1 + 2,5q_2 + 3,5q_3}{100} \quad (21)$$

где q_0 – остаток на сборном дне анализатора; q_1, q_2, q_3 – остатки на ситах с отверстиями диаметром 1, 2, 3 мм.

Для крупного рогатого скота принимают комбикорма с крупным размолом (средним диаметром частиц 1,8...2,6 мм).

С целью определения пределов регулирования угловой скорости роторов были проведены эксперименты. Исходным материалом были овес (легко дробимый) и ячмень (тяжело дробимый) при влажности 15 %.

В результате экспериментов установлена следующая эмпирическая зависимость между скоростью удара, величиной загрузки установки и модулем помола:

$$d_{cp} = d_0 \exp[-\lambda(V - V_{kp})] + \alpha Q, \quad (22)$$

где d_0 – начальный размер частиц, мм; λ – параметр процесса, с/м; V – скорость удара, м/с; V_{kp} – скорость удара, при которой начинается дробление материала, м/с; Q – производительность установки, кг/с; A – постоянный коэффициент.

Эксперименты показали, что требуемый диапазон регулирования угловой скорости малого ротора составляет $-80...+400$ рад/с. Такой широкий диапазон регулирования может быть обеспечен при использовании электродвигателя постоянного тока или асинхронного электродвигателя с преобразователем частоты. Если верхний предел помола ограничить модулем 1,2 мм, то можно применить многоскоростные асинхронные электродвигатели. Применение двухскоростного привода малого ротора позволяет получить различные скорости: номинальную, пониженную, нулевую, пониженную и номинальную при реверсе двигателя.

Нулевую угловую скорость можно получить динамическим торможением. Применяя асинхронный электродвигатель в режимах пониженной скорости и тормозном, получил повышение производительности установки в соответствии с формулой (11) в 1,3 и 1,9 раза.

Диапазон регулирования угловой скорости большого ротора может быть определен исходя из следующего соотношения:

$$\Delta\omega_{II}R_{II} = \Delta\omega_I R_I, \quad (23)$$

где $\Delta\omega_I = \omega_{I\max} - \omega_{I\min}$, $\Delta\omega_{II} = \omega_{II\max} - \omega_{II\min}$ – пределы регулирования угловой скорости малого и большого роторов.

Выражение (23) получено при постоянной степени измельчения материала.

Заключение. Таким образом, степень измельчения материала целесообразно изменять регулированием угловой скорости малого ротора, так как при этом потребляемая мощность минимальна. Наиболее приемлемой схемой регулирования будет та, которая позволяет одновременно изменять угловую скорость привода малого ротора и производительность установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирков С.В., Пилюгин К.А., Сабиев У.К. Измельчители фуражного зерна. Уфа, 2017. С. 10–13.
2. Искендеров Р.Р., Очинский В.В., Лебедев А.Т. Измельчение зерновых материалов: проблемы и способы их решения // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК: сборник научных статей «Агроуниверсал». Ставрополь, 2015. С. 19–22.
3. Лухт Е. Ступенчатое измельчение в молотковой и вальцовой дробилках // Комбикорма. 2012. № 1. С. 55–57.
4. Сергеев Н. С. Центробежно-роторные измельчители фуражного зерна: автореф. дис. ... канд. техн. Наук. Челябинск, 2008.



5. Ляпин В.В. Совершенствование рабочего процесса ударно-центробежного измельчителя: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2009. 18 с.
6. Василенко Н., Типов В. Дезинтегратор для измельчения зерна и минерального сырья: научное издание // Комбикорма. 2007. № 5. С. 40.
7. Сабиев У.К., Пушкарев А.С. Модернизированный измельчитель зерновых материалов // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. 2017. № 1(8). С. 221–227.
8. Лебедев А.Т., Искендеров Р.Р., Шумчкий А.С. К вопросу повышения долговечности рабочих органов роторной дробилки // Наука в центральной России. 2018. № 5(29). С. 36–43.
9. Савиных П.А., Палицын А.В., Иванов И.И. Исследование измельчителя фуражного зерна роторно-центробежного типа с различными рабочими органами // Молочно хозяйственный вестник. 2017. № 2(26). С. 119–130.
10. Сергеев Н.С. Центробежно-роторные измельчители фуражного зерна: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Челябинск, 2008. 40 с.
11. ГОСТ 9268-90 Комбикорма-концентраты для крупного рогатого скота. Технические условия. М., 2002. 118 с.

REFERENCES

1. Birkov S.V., Pilyugin K.A., Sabiev U.K. Feed grain grinders. Ufa, 2017: 10–13.
2. Iskenderov R.R., Ochinsky V.V., Lebedev A.T. Grinding of grain materials: problems and ways to solve them. *Actual problems of scientific and technological progress in agriculture*. Stavropol, 2015: 19-22.
3. Luht E. Stepwise grinding in hammer and roller crushers. *Compound feed*. 2012; 1: 55–57.
4. Sergeev N. S. Centrifugal rotary feed grain shredders. Chelyabinsk, 2008
5. Lyapin V.V. Improvement of the working process of a shock-centrifugal measuring device. Voronezh, 2009. 18 p.
6. Vasilenko N., Tipov V. Disintegrator for grinding grain and mineral raw materials: scientific publication. *Compound feed*. 2007; 5: 40.
7. Sabiev U.K., Pushkarev A.S. Modernized shredder of grain materials. *Electronic scientific and methodological journal of Omsk State Agrarian University*. 2017; 1(8): 221–227.
8. Lebedev A.T., Iskenderov R.R., Shumchky A.S. On the issue of increasing the durability of the working bodies of a rotary crusher. *Science in central Russia*. 2018; 5(29): 36–43.
9. Savinykh P.A., Palitsyn A.V., Ivanov I.I. Investigation of feed grain shredder of rotary-centrifugal type with various working bodies. *Dairy and economic bulletin. -Vologda State Medical University named after N.V. Vereshagin*. 2017; 2(26): 119–130.
10. Sergeev N.S. Centrifugal-rotary feed grain grinders. Chelyabinsk, 2008. 40 p.
11. GOST 9268-90 Compound feed concentrators for cattle. Technical conditions. Moscow, 2002. 118 p.

*Статья поступила в редакцию 30.07.2022; одобрена после рецензирования 21.09.2022; принята к публикации 1.10.2022.
The article was submitted 30.07.2022; approved after reviewing 21.09.2022; accepted for publication 1.10.2022.*

