

DOI
УДК 639.11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РЕЗАНИЕМ В ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ КОРМОВ

Р. С. Пополднев, Б. Г. Зиганшин, А. В. Алешкин, А. В. Дмитриев,
Д. Т. Халиуллин, И. Х. Гайфуллин

Реферат. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения энергоемкости и потерь питательной ценности кормов с одновременным улучшением качественных показателей в процессе измельчения. Работу проводили с целью теоретических исследований конструктивно-технологических параметров измельчителя кормов и определения энергозатрат процесса измельчения резанием. Научная новизна исследования заключается в математических моделях для определения работы резания и суммарной мощности привода измельчителя кормов. При проведении исследований применяли общенаучные положения теории упругости, теории оболочек, механики разрушения, учитывали физико-механические и технологические свойства кормов растительного происхождения. Предложено устройство, конструкция которого обеспечивает равномерную подачу материала в зону резания (на ножи) благодаря рабочей камере в виде усеченного конуса, что приводит к последовательному уменьшению размеров корма до установленных зоотехническими требованиями и улучшает его качество; регулировку интенсивности процесса измельчения, обусловленную возможностью изменения угла наклона поворотных противорезающих ножей; снижение энергоемкости измельчения благодаря свободному перемещению корма к выгрузной камере и оригинальной форме лопасти швырляки. Получены аналитические выражения по определению работы резания на каждом ряде ножей для одного ножа в ряду, суммарной работы всех ножей за один оборот, а также необходимой мощности на привод ротора. Энергоемкость процесса измельчения определяется как сумма затрат на резание, разгон материала и холостого хода ротора. Полная мощность, необходимая для привода измельчителя зависит от количества и геометрических характеристик измельчающих и противорезающих ножей, частоты вращения ротора, свойства измельчаемого материала.

Ключевые слова: животноводство, корма, измельчитель, процесс измельчения, энергозатраты.

Введение. Измельчение – наиболее энергоемкая операция в технологии приготовления кормов, на которую затрачивается около 50% электроэнергии [1]. Поэтому в небольших сельскохозяйственных предприятиях и фермерских хозяйствах всегда есть необходимость в использовании измельчителей кормов, отличающихся высокой эффективностью, небольшим потреблением энергии, малыми габаритами, которые одновременно способны производить продукт высокого качества с заданными параметрами [2, 3]. На основе исследований процесса измельчения кормов выявлено, что основные факторы, от которых зависит его эффективность – частота вращения ротора с ножами, количество и геометрические параметры ножей, площадь резания ножей за оборот ротора, угол наклона противорезающих ножей и их число [4, 5]. Кроме того, определено, что производство высококачественных кормов возможно при последовательном уменьшении частиц измельченного продукта до установленных зоотехническими требованиями параметров при непрерывной загрузке измельчителя (исходным материалом) и разгрузки (готовый продукт) [6, 7, 8]. При этом, на наш взгляд, остается нерешенным вопросом рациональный расход электроэнергии при приготовлении кормов, что оставляет актуальной задачу снижения энергоемкости процесса с одновременным улучшением качественных показателей как процесса измельчения, так и производимого корма.

Цель исследований – теоретические исследования конструктивно-технологических

параметров и определение энергозатрат процесса измельчения резанием измельчителя кормов.

Условия, материалы и методы. Процесс измельчения кормов рассмотрим, как процесс резания, состоящий из этапов уплотнения и резания (разрезания) материала, когда происходит увеличение количества новых частиц и площади поверхности материала при одновременном уменьшении его линейных размеров. Факторы, который при этом влияют на энергоемкость процесса, – скорость резания материала, угол скольжения, геометрия и расположение в устройстве режущего элемента [9, 10]. Рассматриваемый измельчитель кормов содержит рабочую камеру 1 с приемным бункером 2, измельчающие ножи 3 на валу 4, поворотные противорезающие ножи 5 на внутренней поверхности рабочей камеры и выгрузную камеру 6 с размещенной в ней лопастной швырлякой 7 с ножами 8 (рис. 1). Измельчающие ножи 3 расположены с постоянным и равномерным уменьшением расстояния один от другого на 10...20%, начиная от верхнего ножа к нижнему, а рабочая камера выполнена в виде усеченного конуса [11].

При работе материал поступает в верхнюю часть рабочей камеры, где расстояние между ножами больше, чем в нижней. Это необходимо, чтобы измельчение происходило последовательно. В результате на ножи оказывается равномерная нагрузка по всей рабочей камере. Выполнение рабочей камеры в виде усеченного конуса с радиусом большего размера в нижней части приводит к увеличению ее рабочей

площади по мере продвижения измельчаемого материала, что позволяет ему свободно перемещаться в выгрузочную камеру, исключая переизмельчение.

Положение поворотных противорезающих ножей 5 можно изменять и фиксировать под углом от 00 до 900 к измельчающему ножу 3,

а ширина поворотного ножа равна 0,8...0,9 расстояния между измельчающими ножами. Для регулировки интенсивности процесса измельчения материала можно изменять время его нахождения в зоне измельчения, для чего необходимо изменить рабочей угол поворота ножа.

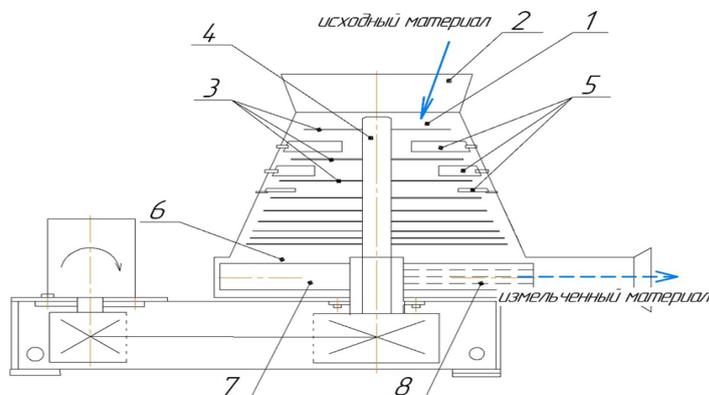


Рис. 1 – Конструктивно-технологическая схема измельчителя кормов: 1 – камера измельчения; 2 – бункер приемный; 3 – ножи измельчающие; 4 – вал ротора; 5 – ножи поворотные противорезающие; 6 – камера выгрузная; 7 – швырляка лопастная; 8 – ножи швырлялки

Представленная конструкция измельчителя имеет ряд преимуществ, по сравнению с известными аналогами: рабочая камера в виде усеченного конуса обеспечивает равномерную подачу материала в зону резания (на ножи), что в итоге приводит к последовательному уменьшению размеров корма до установленных зоотехническими требованиями и улучшает его качество; изменение угла наклона поворотных противорезающих ножей обеспечивает регулировку интенсивности процесса измельчения; свободное перемещение измельченного корма в выгрузочную камеру, в том

числе благодаря оригинальной формы лопасти швырляки, позволяет снизить энергоемкость измельчения [12, 13, 14].

В ходе исследований использовали общенаучные методы математики, физики, теории упругости, теории оболочек, механики разрушения с учетом физико-механических и технологических свойств кормов растительного происхождения [15, 16, 17].

Результаты и обсуждение. Для определения энергозатрат при резании исходного материала ножом рассмотрим схему их силового взаимодействия [18] (рис. 2).

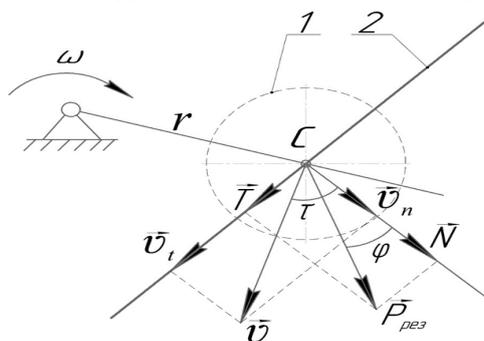


Рис. 2 – Схема разложения сил резания на составляющие: 1 – горловина приемного бункера; 2 – нож измельчающий; ω – угловая скорость ротора; r – расстояние от точки резания до оси вращения ножа; C – точка резания; \vec{N} – нормальная составляющая силы резания; \vec{T} – касательная составляющая силы резания; τ – угол скользщего резания; $\vec{P}_{рез}$ – сила скользщего резания; \vec{v} – скорость резания; \vec{v}_t – касательная составляющая скорости резания; \vec{v}_n – нормальная составляющая скорости резания; φ – угол трения;

При скользящем резании его силу можно разложить на составляющие:

$$\vec{P}_{рез} = \vec{N} + \vec{T} \quad (1)$$

где

\vec{N} – нормальная составляющая силы резания, перпендикулярная к линии ножа, Н;

\vec{T} – касательная составляющая, Н, причем

$$T = Nf' \quad (2)$$

где

f' – коэффициент скользящего резания.

Момент сил резания складывается из суммы моментов их составляющих

$$M_{рез} = Tr \sin(\tau) + Nr \cos(\tau) = Nr \cos(\tau)(1 + f'tg(\tau)) \quad (3)$$

где

r – расстояние от точки резания до оси вращения ножа, м;

τ – угол скользящего резания, град.

Угол τ определяется как угол между вектором скорости точки ножа и нормалью к линии лезвия ножа.

Величина нормальной составляющей силы резания равна:

$$N = q\Delta l \quad (4)$$

где

q – удельная линейная сила ножа, Н/м;
 Δl – длина нагруженной части лезвия, м.

Мощность силы резания с учетом (3) и (4) определится так:

$$W_{рез} = M_{рез} \omega = q\Delta l r \omega \cos(\tau)(1 + f'tg(\tau)) \quad (5)$$

Выражение (5) характеризует зависимость мощности силы резания от конструктивных (расстояние от точки резания до оси вращения ножа, длина нагруженной части лезвия) и технологических (угловая скорость ротора, угол скользящего резания) параметров измельчителя, а также специфических свойств измельчаемого материала.

Площадь, которую прорезает лезвие длиной Δl в единицу времени $\frac{\Delta S}{dt}$

$$\frac{\Delta S}{dt} = \Delta l r \omega \cos(\tau) \quad (6)$$

Работа, отнесенная к единице площади среза A_{yd} :

$$A_{yo} = \frac{A}{\Delta S} = \frac{W_{рез}}{\left(\frac{\Delta S}{dt}\right)} = q(1 + f'tg(\tau)) \quad (7)$$

Тогда работа на первый одиночный срез верхним ножом определится так:

$$A_1 = A_{yo} k_0 S = q(1 + f'tg(\tau)) k_0 S \quad (8)$$

для усредненных расчетов можно принять угол τ в положении лезвия при проходе им центра загрузочной горловины.

Величина удельной линейной силы ножа в случае резания без скольжения, q_0 зависит от свойств материала и заточки ножа. Н. Е. Резник [19] предложил, определять ее по выражению:

$$q_0 = \delta \sigma_p + \frac{E h_{сж}^2}{2h} (tg(\beta) + f \sin^2(\beta) + \mu(f + \cos^2(\beta))) \quad (9)$$

где

δ – острота (толщина) лезвия, м;

σ_p – разрушающее напряжение, Па;

E – модуль упругости материала, Па;

$h_{сж}$ – толщина сжимаемого лезвием ножа материала до момента начала резания, м;

h – толщина слоя перерезаемого материала, м;

β – угол заточки лезвия ножа, град.;

f – коэффициент трения лезвия ножа о материал;

μ – коэффициент Пуассона.

Удельная линейная сила ножа в случае резания со скольжением, снижается с увеличением угла резания по эмпирическому соотношению [19]:

$$q = q_0 - \alpha' \tau \quad (10)$$

где α' – коэффициент, $\alpha' = (50...60)$ при q_0 в Н/м и τ в градусах.

Представим это соотношение в виде:

$$q = q_0 \left(1 - \alpha \frac{\tau}{90}\right) \quad (11)$$

где α – безразмерный коэффициент, определяемый по экспериментальным данным (принимался равным $\alpha = (0,5...0,6)$).

Для дальнейшего расчета примем ряд допущений для усредненных характеристик взаимодействия ножей и частиц материала: каждый ряд ножей, при воздействии на каждую частицу разрезает ее на две части, так что средняя длина частиц уменьшается в два раза, а количество частиц, переходящих на следующий ряд ножей увеличивается в два раза.

Это допущение также справедливо при измельчении вытянутых по одному измерению частиц. При переходе на следующую ступень резания (на ниже установленный ряд ножей) площадь материала, которую необходимо разрезать удваивается, так что на каждом ряде ножей:

$$S_i = 2^{(i-1)} S \quad (12)$$

$$i = 1, \dots, k$$

Работа резания на каждом ряде ножей для одного ножа в ряду равна

$$A_2 = 2A_{y0}k_0S = 2q(1 + f'tg(\tau))k_0S ;$$

$$A_i = 2^{(i-1)}A_{y0}k_0S = 2^{(i-1)}q_i(1 + f'tg(\tau_i))k_0S ; \quad (13)$$

$$A_k = 2^{(k-1)}A_{y0}k_0S = 2^{(k-1)}q_k(1 + f'tg(\tau_k))k_0S .$$

Для каждого ряда $i=1, \dots, k$ диапазоны угла τ_i и q_i по выражению (11) будут различными. Возьмем усредненные значения при расчете каждого ряда ножей.

Если форма частиц близка к кубу, то при однократном разрезе на две части степень изменения площади среза стремится к $\sqrt[3]{2}$. Начиная с некоторого ряда ножей, размер частиц по трем измерениям будет сближаться. Кроме того, не каждая частица перерезается ниже-расположенным ножом, поэтому степень изменения площади среза отличается в меньшую сторону и может быть меньше единицы.

В случае, если принятое допущение об удвоении площади среза не справедливо, можно задавать степень измельчения в каждом ряду ножей индивидуально. Отметим, что регулирование угла установки и положения противорезов дает возможность изменять количество срезов каждым рядом ножей. Тогда, задавая индивидуально степень измельчения на каждой ступени, выражение (13) примет вид

$$A_i = A_{y0}k_0S \prod_{j=1}^{i-1} u_j = q_i(1 + f'tg(\tau_i))k_0S \prod_{j=1}^{i-1} u_j , \quad (14)$$

где

$\prod_{j=1}^{i-1} u_j$ – произведение степеней измельчения u_j на каждом ряде ножей с первого до предыдущего u_{j-1} .

Причем, для $i=1$ принимаем $u_{j-1}=1$, так как первый ряд ножей определяет размер исходной частицы материала, подлежащих последующему перерезанию.

За один оборот ротора в камеру измельчения поступает порция материала от двух ножей верхнего ряда, следовательно, суммарная работа всех ножей за один оборот будет равна:

$$A_{сум} = 2 \sum_{i=1}^k A_i . \quad (15)$$

Время одного оборота ротора:

$$t = \frac{2\pi}{\omega} .$$

Тогда мощность сил резания определим так:

$$W_{рез}^{сум} = \frac{A_{сум}}{t} = \frac{\omega}{\pi} \sum_{i=1}^k A_i , \quad (16)$$

где k – количество рядов ножей, $k=(3..9)$.

Суммарный момент сил резания равен коэффициенту при угловой скорости в выражении мощности (16):

$$M_{рез}^{сум} = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^k A_i . \quad (17)$$

Кроме затрат мощности на процесс резания энергия расходуется на перемещение материала к периферии камеры измельчения и на холостой ход ротора. Расход мощности на перемещение материала определим с использованием теоремы об изменении кинетического момента:

$$\frac{dK}{dt} = M - M_{рез}^{сум} - M_{ХХ} , \quad (18)$$

где

M – момент, подводимый к ротору от двигателя;

$(-M_{ХХ})$ – момент, расходуемый на холостой ход;

K – кинетический момент ротора и материала в измельчителе;

$(-M_{рез}^{сум})$ – момент внешних сил со стороны камеры измельчения с противорезами относительно оси вращения.

Выразим из уравнения (18) момент, подводимый к ротору:

$$M = M_{рез}^{сум} + M_{ХХ} + \frac{dK}{dt} . \quad (19)$$

Кинетический момент, относительно оси вращения K , с учетом малости момента относительной скорости материала, по сравнению с переносной, равен:

$$K = j\omega + Qtr^2\omega_M , \quad (20)$$

где

ω_M – угловая скорость материала в камере измельчения, равна ω на выходе из измельчителя и нулю – на входе.

При установившемся режиме первое слагаемое в выражении (20) постоянно. Тогда, при нулевой угловой скорости на входе материала, получим:

$$K = j\omega ;$$

$$K_K = j\omega + Qtr_k^2\omega ; \quad (21)$$

$$\frac{dK}{dt} = \frac{K_K - K_0}{t} = Qr_k^2\omega .$$

Мощность на разгон материала:

$$W_M = \frac{dK}{dt} \omega = Qr_k^2\omega^2 . \quad (22)$$

Таким образом, средняя мощность W , подводимая к ротору, определится так:

$$W = W_{рез}^{сум} + W_M + W_{ХХ} , \quad (23)$$

где $W_{ХХ}$ – мощность на холостой ход.

Мощность на холостой ход определяется экспериментально, для вычислительных экспериментов ее принимали равной

$$W_{ХХ} = (0,15...0,2)(W_{рез}^{сум} + W_M)$$

В затраты на холостой ход включали непродуктивные затраты энергии на перемешивание материала – преодоление трения частиц о стенки камеры и между собой.

Выводы. На основании теоретического изучения процесса измельчения кормов в роторном измельчителе с рабочей камерой в виде усеченного конуса получены аналитические выражения для определения работы резания на каждом ряде ножей, суммарной работы всех ножей за один оборот и необходимой мощности для привода ротора.

Энергоемкость процесса измельчения определяется как сумма затрат на резание, разгон материала и холостого хода ротора. Мощность силы резания зависит от конструктивно-технологических параметров и специфических свойств измельчаемого материала, мощность на разгон материала к периферии камеры измельчения – от кинематического

момента ротора и материала.

Кроме затрат мощности на процесс резания и разгона материала энергия расходуется на холостой ход ротора, включающий в себя непродуктивные затраты энергии на перемешивание материала – преодоление трения частиц о стенки камеры и между собой.

Полная мощность, необходимая для привода измельчителя, зависит от количества и геометрических характеристик измельчающих и противорезающих ножей, частоты вращения ротора, свойства измельчаемого материала.

Численные решения полученных зависимостей позволят обосновать конструктивно-технологические параметры рабочих органов измельчителя при минимальных значениях потребной мощности с производством измельченных кормов, соответствующих зоотехническим требованиям.

Литература

1. Ряднов А. И., Федорова О. А., Мамахай А. К. Выбор частных показателей комплексной оценки эффективности использования измельчителя корнеклубнеплодов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68. № 4(45). С. 45-50.
2. Определение оптимальных режимов работы центробежного измельчителя фуражного зерна / М. С. Волхонов, А. М. Абалихин, Д. В. Барабанов и др. // Аграрная наука. 2023. № 6. С. 111-115.
3. Ivanov A. S., Sheludyakov N. V. A Universal Root Crop Chopper for Cattle// Мир науки без границ: Материалы 8-й Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных с международным участием, Тамбов, 12 февраля 2021 года. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2021. Р. 79-82.
4. Морозова Н.Ю., Фролов В.Ю. Обоснование технологического процесса измельчения стебельных кормов рабочим органом молотково-сегментного типа // Молодая наука аграрного Дона: традиции, опыт, инновации. 2018. № 2-2. С. 149-151.
5. Ибрагимов А.З., Абдиева Н. Ф. Анализ процесса регулирования режимов измельчителя зерна на ступенчато-роторном измельчителе // Аграрный научный журнал. 2023. № 4. С. 106-111.
6. Хайдаров Р.Р., Зиганшин Б.Г. Универсальный измельчитель корнеклубнеплодов ИКХ-5,5 // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2012. Т. 7. № 1 (23). С. 109-111.
7. Превентивная стратегия технического обслуживания дробильного оборудования / И. Х. Гималтдинов, Б. Г. Зиганшин, И. Г. Галиев и др. // Вестник Казанского ГАУ. 2020. Т. 15. № 3(59). С. 71-76. doi: 10.12737/2073-0462-2020-71-76.
8. Нуруллин Э. Г., Халиуллин Д. Т., Нуруллин Э. Э. Определение траекторий семян в горизонтальном сечении конфузора пневмомеханической семенорушки // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 10. С. 187-189.
9. Modeling the destruction of the grain shell of cereal crops / E. G. Nurullin, A. V. Dmitriev, D. T. Khaliullin, et al. // BIO Web of Conferences : International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources”. Kazan: EDP Sciences, 2022. Vol. 52. P. 00060. URL: https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2022/11/bioconf_fies2022_00060/bioconf_fies2022_00060.html (дата обращения: 01.09.2023). doi: 10.1051/bioconf/20225200060.
10. Пополднев Р.С., Сабиров Б.М. Обзор конструкций измельчителей кормов // Современное состояние и перспективы развития технической базы агропромышленного комплекса: научные труды Международной научно-практической конференции. Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2021. С. 13-22.
11. Исследование устройства для дробления зерна / Б. М. Сабиров, Б. Г. Зиганшин, А. В. Дмитриев и др. // Вестник Казанского ГАУ. 2023. Т. 18. № 1(69). С. 75-79. doi: 10.12737/2073-0462-2023-75-79.
12. Обоснование параметров измельчителя кормов / Б. Г. Зиганшин, П. В. Зайцев, Д. Т. Халиуллин и др. // Вестник Курганской ГСХА. 2023. № 1(45). С. 69-77.
13. Изучение условий защемления клубней в измельчителе корнеклубнеплодов / А. В. Алешкин, С. Ю. Булатов, П. А. Савиных и др. // Вестник НГИЭИ. 2016. № 10(65). С. 54-61.
14. Исследование движения воздушно-зерновой смеси в рабочей зоне семенорушки аэромеханического типа / Д. Т. Халиуллин, А. В. Дмитриев, Р. Н. Хафизов и др. // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2019. Т. 12. № 4(63). С. 27-37. doi: 10.17238/issn2071-2243.2019.4.27.
15. Александрова Н.Р., Субаева А.К., Гайнутдинов И.Г. Совершенствование методического подхода к оценке воспроизводства основных средств сельского хозяйства // Вестник Казанского ГАУ. 2022. Т. 17. № 4 (68). С. 122-127.
16. Савиных П. А., Булатов С. Ю., Смирнов Р. А. Оптимизация рабочего процесса измельчителя корнеклубнеплодов // Вестник Марийского государственного университета. Серия: Сельскохозяйственные науки. Экономические науки. 2015. Т. 1. № 3(3). С. 36-42.
17. Алешкин В.Р., Рошин П.М. Механизация животноводства / 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1993. 319 с.
18. Резник Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. М.: Машиностроение,

1975. 312 с.

19. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. Л.: Колос, 1978. 560 с.

Сведения об авторах:

Пополднев Родион Сергеевич – соискатель, e-mail:

Зиганшин Булат Гусманович – доктор технических наук, профессор РАН, первый проректор — проректор по научной работе и цифровой трансформации, профессор кафедры машин и оборудования в агробизнесе, e-mail: zigan66@mail.ru

Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

Алешкин Алексей Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры механики и инженерной графики, e-mail:

Вятский государственный университет, Киров, Россия

Дмитриев Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования в агробизнесе, проректор по учебно-воспитательной работе молодежной политике, e-mail: avd-work@mail.ru

Халиуллин Дамир Тагирович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой машин и оборудования в агробизнесе, e-mail: damirtag@mail.ru

Гайфуллин Ильнур Хамзович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры машин и оборудования в агробизнесе, e-mail: ilnur-gai@yandex.ru

Казанский государственный аграрный университет, г. Казань, Россия.

DETERMINING THE ENERGY CONSUMPTION OF THE PROCESS OF GRINDING BY CUTTING IN A FEED GRINDER

**R. S. Popoldnev, B. G. Ziganshin, A. V. Aleshkin, A. V. Dmitriev,
D. T. Khaliullin, I. Kh. Gayfullin**

Abstract. The relevance of the study is due to the need to reduce energy intensity and loss of nutritional value of feed while simultaneously improving quality indicators during the grinding process. The work was carried out with the aim of theoretical studies of the design and technological parameters of the feed chopper and determining the energy consumption of the grinding process by cutting. The scientific novelty of the research lies in the mathematical models for determining the cutting work and the total drive power of the feed chopper. When carrying out the research, the general scientific principles of the theory of elasticity, the theory of shells, and fracture mechanics were used, and the physical, mechanical and technological properties of feed of plant origin were also taken into account. A device is proposed, the design of which has the following advantages: a uniform supply of material to the cutting zone (to the knives) is ensured due to the working chamber in the form of a truncated cone, which leads to a consistent reduction in the size of the feed to those established by zootechnical requirements and improves its quality; the ability to change the angle of inclination of the rotary counter-cutting knives, which provides adjustment of the intensity of the grinding process; reduction in the energy intensity of grinding due to the free movement of crushed feed into the unloading chamber and the original shape of the tosser blade. Analytical expressions were obtained to determine the cutting work on each row of knives for one knife in a row, the total work of all knives per revolution, as well as the required power for the rotor drive. As a result of the research, it was established that the energy intensity of the grinding process is determined as the sum of the costs of cutting, acceleration of the material and idling of the rotor. The total power required to drive the chopper depends on the number, geometric characteristics of the chopper and counter-cutting knives, the rotor speed, and the properties of the material being crushed.

Key words: animal husbandry, feed, shredder, shredding process, energy consumption.

References

- Ryadnov AI, Fedorova OA, Mamakhay AK. [Selection of particular indicators for a comprehensive assessment of the efficiency of using a root crop shredder]. *Elektrotehnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2021; Vol.68. 4(45). 45-50 p.
- Volkhonov MS, Abalikhin AM, Barabanov DV. [Determination of optimal operating modes of a centrifugal feed grain grinder]. *Agrarnaya nauka*. 2023; 6. 111-115 p.
- Ivanov AS, Sheludyakov NV. [Universal root crop chopper for cattle. The world of science without borders]. *Materialy 8-i Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem, Tambov, 12 fevralya 2021 goda*. Tambov: Tambovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. 2021; 79-82 p.
- Morozova NYu, Frolov VYu. [Justification of the technological process of grinding stem forages using a hammer-segment type working unit]. *Molodaya nauka agrarnogo Dona: traditsii, opyt, innovatsii*. 2018; 2-2. 149-151 p.
- Ibragimov AZ, Abdieva NF. [Analysis of the process of regulating the modes of a grain grinder on a step-rotary grinder]. *Agrarnyi nauchnyi zhurnal*. 2023; 4. 106-111 p.
- Khaydarov RR, Ziganshin BG. [Universal chopper of root and tuber crops IKKh-5.5]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2012; Vol.7. 1 (23). 109-111 p.
- Gimaltdinov IKh, Ziganshin BG, Galiev IG. [Preventive strategy for the maintenance of crushing equipment]. *Vestnik Kazanskogo GAU*. 2020; Vol.15. 3(59). 71-76 p. doi: 10.12737/2073-0462-2020-71-76.
- Nurullin EG, Khaliullin DT, Nurullin EE. [Determination of seed trajectories in the horizontal section of the confuser of a pneumomechanical seed crusher]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2012; Vol.15. 10. 187-189 p.
- Nurullin EG, Dmitriev AV, Khaliullin DT. Modeling the destruction of the grain shell of cereal crops. [Internet]. *BIO Web of Conferences: International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources"*. Kazan: EDP Sciences, 2022; Vol.52. 00060 p. [cited 2023, September 01]. Available from: https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2022/11/bioconf_fies2022_00060/bioconf_fies2022_00060.html. doi: 10.1051/bioconf/20225200060.
- Popoldnev RS, Sabirov BM. [Review of feed chopper designs. Current state and prospects for the development of the technical base of the agro-industrial complex]. *Nauchnye trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kazan': Izd-vo Kazanskogo GAU*. 2021; 13-22 p.
- Sabirov BM, Ziganshin BG, Dmitriev AV. [Study of a device for crushing grain]. *Vestnik Kazanskogo GAU*. 2023; Vol.18. 1(69). 75-79 p. doi: 10.12737/2073-0462-2023-75-79.
- Ziganshin BG, Zaytsev PV, Khaliullin DT [Justification of feed chopper's parameters]. *Vestnik Kurganskoi GSKhA*. 2023; 1(45). 69-77 p.

13. Aleshkin AV, Bulatov SYu, Savinykh PA. [Study of the conditions for pinching tubers in a root crop crusher]. Vestnik NGIEI. 2016; 10(65). 54-61 p.
14. Khaliullin DT, Dmitriev AV, Khafizov RN. [Study of the movement of the air-grain mixture in the working area of the aeromechanical type seed grinder]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2019; Vol.12. 4(63). 27-37 p. doi: 10.17238/issn2071-2243.2019.4.27.
15. Aleksandrova NR, Subaeva AK, Gaynutdinov IG. [Improving the methodological approach to assessing the reproduction of fixed assets of agriculture]. Vestnik Kazanskogo GAU. 2022; Vol.17. 4(68). 122-127 p.
16. Savinykh PA, Bulatov SYu, Smirnov RA. [Optimization of the working process of a root crop crusher]. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sel'skokhozyaistvennye nauki. Ekonomicheskie nauki. 2015; Vol.1. 3 (3). 36-42 p.
17. Aleshkin VR, Roshchin PM. Mekhanizatsiya zhivotnovodstva: 2-e izd., pererab. i dop. [Mechanization of livestock farming: 2nd edited, revised and additional]. Moscow: Kolos. 1993; 319 p.
18. Reznik NE. Teoriya rezaniya lezviem i osnovy rascheta rezhushchikh apparatov. [The theory of cutting with a blade and the basics of calculating cutting devices]. Moscow: Mashinostroenie. 1975; 312 p.
19. Mel'nikov SV. Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya zhivotnovodcheskikh ferm. [Mechanization and automation of livestock farms]. Leningrad: Kolos. 1978; 560 p.

Authors:

Popoldnev Rodion Sergeevich – the applicant, e-mail:

Ziganshin Bulat Gusmanovich – - Doctor of Technical sciences, Professor of Russian Academy of Sciences, First Vice-Rector - Vice-Rector for Research and Digital Transformation, Professor of the Department of Machinery and Equipment in Agribusiness, e-mail: zigan66@mail.ru

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia

Aleshkin Aleksey Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, e-mail:

Vyatka State University, Kirov, Russia

Dmitriev Andrey Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machinery and Equipment in Agribusiness, Vice-Rector for Educational Work and Youth Policy, e-mail: avd-work@mail.ru

Khaliullin Damir Tagirovich – Ph.D. of Technical Sciences, Head of Machinery and Equipment in Agribusiness Department, e-mail: damirtag@mail.ru

Gayfullin Ilnur Khamzovich – Ph.D. of Technical Sciences, senior lecturer at the Department of Machinery and Equipment in Agribusiness, e-mail: ilnur-gai@yandex.ru

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.