

УДК 631.363.636

UDC 631.363.636

05.20.00 Процессы и машины агроинженерных систем

Processes and machines of Agroengineering systems

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ РУЛОНА И ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СТЕБЕЛЬНЫХ КОРМОВ ДВУХПЛОСКОСТНЫМИ СЕГМЕНТАМИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ШНЕКОВОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА**

**THEORETICAL STUDIES OF THE PROCESS OF DESTRUCTION OF THE COIL AND STEM GRINDING FEED PLANE SEGMENTS VERTICAL SCREW WORKING BODY**

Сысоев Денис Петрович  
к.т.н., доцент  
Scopus Author ID: 57073933900  
РИНЦ SPIN-код: 8793-1200  
[sysoev.d@mail.ru](mailto:sysoev.d@mail.ru)

Sysoev Denis Petrovich  
Cand.Tech.Sci., docent  
Scopus Author ID: 57073933900  
RSCI SPIN-code: 8793-1200  
[sysoev.d@mail.ru](mailto:sysoev.d@mail.ru)

Журтов Алим Хасанович  
инженер  
*Кубанский государственный аграрный университет, Россия, 350044, Краснодар, Калинина, 13*

Zhurtov Alim Hasanovic  
Engineer  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

Вопрос ресурсосбережения в процессе приготовления кормовых смесей многофункциональными мобильными агрегатами на животноводческих предприятиях показывает необходимость проведения дальнейших исследований в качественной подготовке кормов к скармливанию с целью полной реализации генетического потенциала животных. Современные машины зачастую не удовлетворяют вышеуказанных потребностей, что требует поиска новых решений. Теоретические исследования процесса измельчения стебельных кормов предложенными двухплоскостными сегментами позволяют определить условия и выделить основные факторы, влияющие на исследуемый процесс, и в последующем снизить их влияние на работу машины в целом

The issue of resource saving in the process of preparation of feed mixtures of multifunctional mobile units on livestock operations shows the need for further qualitative research in the preparation of feed for feeding with the goal of full realization of the genetic potential of animals. Modern cars often do not meet the above requirements that require new solutions. The theoretical study of grinding process feed stem proposed biplane segments allow you to define conditions and to identify the main factors affecting the studied process, and subsequently reduce their impact on the operation of the machine as a whole

Ключевые слова: ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ, СТЕБЕЛЬНЫЕ КОРМА, ШНЕК, ДВУХПЛОСКОСТНОЙ СЕГМЕНТ, КРИВОЛИНЕЙНАЯ РЕЖУЩАЯ КРОМКА

Keywords: GRINDING, STEM FEED, SCREW, TWO-PLANE SEGMENT, CURVED CUTTING EDGE

**Doi: 10.21515/1990-4665-137-005**

**Введение.** В настоящее время, наиболее перспективными с точки зрения зоотехнических и технико-экономических требований является применение в поточно-технологических линиях приготовления и раздачи кормов мобильных кормоприготовительных агрегатов с вертикальным шнековым рабочим органом, оснащенный измельчающими сегментами. В ходе комплексного изучения процесса разрушения рулона и измельчения

стебельных кормов в бункере указанных технических средств был выявлен ряд существенных недостатков – высокая энергоёмкость выполнения процессов при довольно низкой интенсивности измельчения. Это объясняется особенностями процесса резания, обусловленным вероятностным характером поступления материала в зоны измельчения, где в качестве противорезающей системы в основном выступают нижние уплотненные и пристенные слои кормов и непосредственное резание происходит только, когда силы трения в них больше сил, необходимых на разрушение материала.

Анализ ранее проведенных исследований установил, что продолжительность процесса и качество смешивания кормовых компонентов при циркуляции их потоков в бункере вдоль витков вертикального шнекового рабочего органа с измельчающими сегментами зависит от конструкции последних, а также от равномерности измельчения стебельных кормов на основных этапах подготовки их к скармливанию.

**Цель исследования** – снижение времени и затрат энергии на процесс измельчения стебельных кормов путем дополнительной установки по периметру винтовой поверхности шнекового рабочего органа сегментов с вертикальной серповидной режущей кромкой, образующие с горизонтальными ножами целостные двухплоскостные сегменты, способствующие равномерному распределению нагрузки, и осуществляющие при вращательно-поступательном движении многоплоскостное резание со скольжением (рисунок 1).

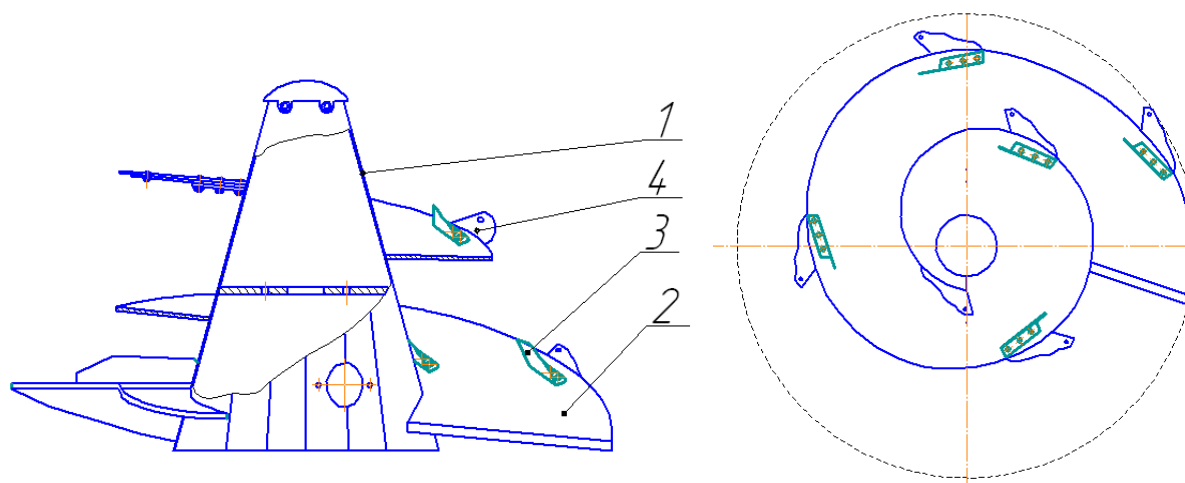


Рисунок 1 – Шнековый рабочий орган с измельчающими сегментами

**Методика исследований.** Шнеки 1, (рисунок 1) с закрепленными по наружному периметру винтовых поверхностей 2 горизонтальными ножами 4 и серповидными измельчающими сегментами 3, расположены таким образом, что винтовая поверхность позволяет перекрывать последующими сегментами пространство первого сегмента. Измельчаемый материал или кормовые компоненты смеси подаются к режущим кромкам измельчающих сегментов навивкой шнека 2.

Также нами предлагается ножевой сегмент (рисунок 2) [2], который осуществляет измельчение материала в продольно-поперечных плоскостях, за счет скользящего резания. Наличие кривизны у режущей кромки лопастей дает возможность захвата измельчаемой массы корма, постепенного ее уплотнения и плавного перерезания. Ввиду хаотичной ориентации стеблей в монолите происходит воздействие ножевого сегмента на материал в различных направлениях (многоплоскостное резание, в частности, продольно-поперечное). Это позволит снизить энергоемкость рабочего процесса и улучшить качество измельчения кормов, повысить эксплуатационную надежность и срок службы машины путем снижения ударной нагрузки и вибрации.

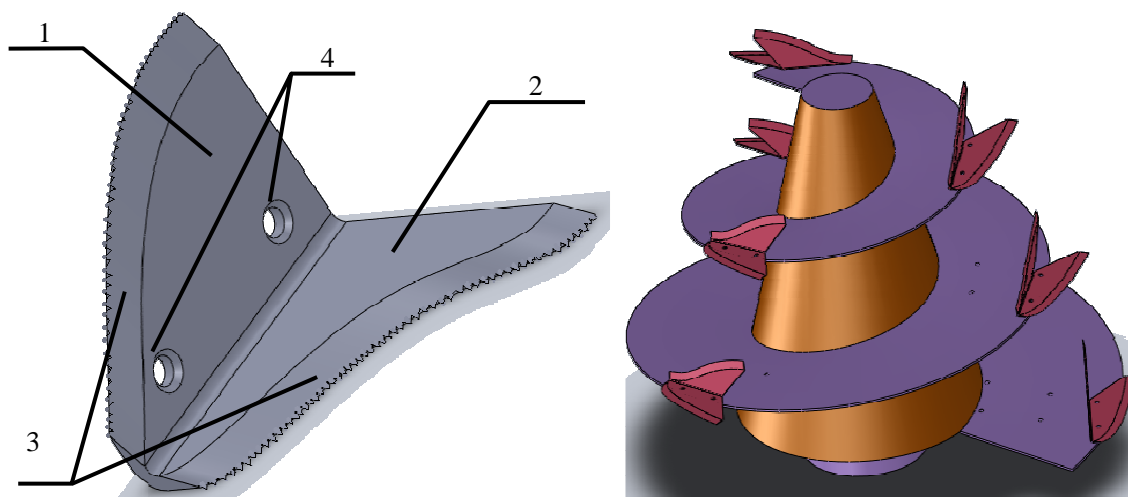


Рисунок 2 – Ножевой сегмент двухлопастной

Ножевой сегмент воздействует на кормовой материал следующим образом. Корм, подлежащий измельчению, попадая на зубчатую режущую кромку 3 горизонтальной плоскости 2, вначале уплотняется до определенного предела, а затем перерезается. При уплотнении корма возникает боковая сила, которая совпадает по направлению с боковым усилием, возникающим при резании, в результате чего возрастает доля скользящего резания и как следствие этого снижение расхода энергии на измельчение корма. Зубчатая режущая кромка 3 вертикальной плоскости 1 захватывает кормовой материал, уплотняет его до определенного предела и, за счет скольжения по зубчатой кромке, перерезает.

Учитывая, что часть передаваемого усилия на входе ножевого сегмента в кормовую массу гасится дугвым профилем режущей кромки, это позволит при работе измельчителя значительно снизить ударные нагрузки и вибрации, следовательно, повысить срок его службы.

В процессе работы винтовыми поверхностями вращающегося шнека корма образуют встречных циркулирующие потоки, при этом горизонтальные ножи 4 (рисунок 1) захватывают стебельный корм, перемещают его вдоль стенок бункера, протаскивая через зазор между противорезом, и измельчают. А кормовой материал, движущийся по наружной винтовой поверхности шнека, подается на режущую кромку серповидных сегмен-

тов 3 и измельчается за счет скользящего резания. При этом повышается эксплуатационная надежность машины, поскольку вращающийся шнековый рабочий орган не дает корму задерживаться и накапливаться. На поверхности шнека при обрушении компонентов с верхней части навивки шнека происходит их слияние и перемешивание. Помимо этого, компоненты корма дополнительно перемешиваются в зоне межвиткового пространства шнека за счет разделения потока вертикальными режущими кромками серповидных сегментов, интенсифицируя тем самым процесс смешивания.

Процесс измельчения наиболее интенсивно протекает на нижнем витке шнека за счет взаимодействия ножевых сегментов и противорезов, а также сил трения материала о бункер и внутреннего трения обусловленного плотностью материала, создающего условия благоприятные для начала резания.

**Результаты исследований.** Анализ ранее проведенных исследований выявил, что для интенсификации разрушения кормовых монолитов, а также измельчения (резания) стебельных кормов наилучшие результаты достигаются при использовании зубчатых режущих кромок ножевых сегментов, где в сочетании с процессом резания вершинами зубьев наблюдается эффект перепиливания [3].

После загрузки в бункер кормового монолита в виде рулона, происходит фрезерование (отделение) сектора в виде цилиндрической поверхности конусной формы. Производительность в общем случае описывает выражение:

$$Q = \omega l S \rho n \quad (1)$$

где  $\omega$  – частота вращения рабочего органа,  $c^{-1}$ ;  $l$  – глубина фрезерования, м;  $S$  – площадь вырезаемой по времени  $t$  фигуры,  $m^2$ ;  $\rho$  – плотность кормового материала,  $kg/m^3$ ;  $n$  – количество сегментов.

Определим площадь материала, снимаемого за первой оборот рабочего органа:

$$S_1 = \iint_D dx dx = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{d}{2\pi}\varphi} \rho d\rho = \int_0^{2\pi} \frac{\rho^2}{2} \Big|_0^{\frac{d}{2\pi}\varphi} d\varphi = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \frac{d^2}{4\pi^2} \varphi^2 d\varphi =$$

$$= \frac{d^2}{8\pi^2} \frac{\varphi^3}{3} \Big|_0^{2\pi} = \frac{d^2}{24\pi^2} 8\pi^3 = \frac{d^2\pi}{3} = \frac{1}{3} S'_1 \quad (2)$$

где  $S'_1$  – площадь круга радиуса  $R - h$ .

Масса материала, получаемая за первый оборот шнека определится

$$M_1 = V_1 \rho = \frac{1}{3} \pi (R - h)^2 D \rho, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность кормового материала.

Производительность рабочего органа в течение первого оборота шнека, учитывая формулу (3), запишется в виде:

$$Q^{(1)} = \frac{M}{T_2} = \frac{\pi (R - h)^2 l \rho}{3 T_2} = \frac{\pi (R - h)^2 l \rho \omega}{3 \cdot 2\pi} = \frac{(R - h)^2 l \rho \omega}{6} \quad (4)$$

При  $i$ -ом обороте шнека производительность составит:

$$Q^{(i)} = \frac{(R - ih)^2 \pi}{3T^{(i)}} \cdot \frac{(i^3 - (i-1)^3)}{i^2} l \rho = \frac{(R - ih)^2 l \rho \omega^{(i)}}{6} \cdot \frac{(i^3 - (i-1)^3)}{i^2}, \quad (5)$$

где  $\omega^{(i)}$  – угловая скорость шнека при его  $i$ -ом обороте.

После ряда преобразований окончательно получим:

$$Q = \frac{1}{6n} \sum_{i=1}^n (R - ih)^2 l \omega^{(i)} \frac{(i^3 - (i-1)^3)}{i^2} \frac{\rho}{e^{-b} \varphi(1 - b\varphi)} \quad (6)$$

где  $n$  – количество двухплоскостных сегментов на шнеке, шт.;  $R$  – радиус шнека, м;  $h$  – вылет сегмента, м;  $l$  – высота сегмента, м;  $\omega$  – угловая скорость шнека,  $c^{-1}$ ;  $\rho$  – плотность материала,  $кг/м^3$ .

В процессе резания материала к нему необходимо приложить силу больше некоторого критического значения. Воспользуемся формулой [6]:

$$P_{кр} = \delta\sigma_p + \frac{Eh^2}{2h} [\operatorname{tg}\beta + f \sin^2 \beta + \mu(f + \cos^2 \beta)]. \quad (7)$$

Потенциальная энергия упругодеформированного тела определяется по формуле:

$$U_{п} = \frac{P^2}{2k_{уп}}. \quad (8)$$

Зная, что  $A_1 = U_{п}$  получим:

$$A_1 = \frac{1}{2k_{уп}} \left( \delta\sigma_p + \frac{Eh^2}{2h} [\operatorname{tg}\beta + f \sin^2 \beta + \mu(f + \cos^2 \beta)] \right)^2 \quad (9)$$

Площадь контура поперечного сечения стебля  $S_1$ . Тогда при  $i$ -ом обороте шнека сегментами будет перерезано число стеблей, равное

$$k_c^{(i)} = \frac{S^{(i)}}{S_1} k_n, \quad (10)$$

где  $k_n$  – количество ножевых сегментов.

И в результате преобразований получим

$$k_c^{(i)} = \left( \frac{R - ih}{R - h} \right)^2 \frac{i^3 - (i-1)^3}{i^2} k_n. \quad (11)$$

Работа, затрачиваемая на резание за  $i$ -ый оборот шнека равна

$$A^{(i)} = A_1 k_c^{(i)}. \quad (12)$$

Мощность, необходимая при  $i$ -ом обороте шнека

$$N^{(i)} = \frac{A^{(i)}}{T^{(i)}}, \quad (13)$$

Используя полученные формулы (11), (12), получим

$$N^{(i)} = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{R - ih}{R - h} \right)^2 \frac{i^3 - (i-1)^3}{i^2} \frac{c_{iv} V_{тр} k_n}{k_{yn}} \cdot \left( \delta \sigma_p + \frac{E h_{сж}^2}{2h} [\operatorname{tg} \beta + f \sin^2 \beta + \mu (f + \cos^2 \beta)] \right)^2 \quad (14)$$

где  $\delta$  – толщина лезвия, м;  $\sigma_p$  – разрушающее контактное напряжение,  $\frac{H}{M^2}$ ;  $f = \operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент трения массы о материал;  $\varphi$  – угол трения;  $h_{сж}$  – углубление лезвия в слой материала толщины  $h$ , м;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль Юнга,  $\frac{H}{M^2}$ .



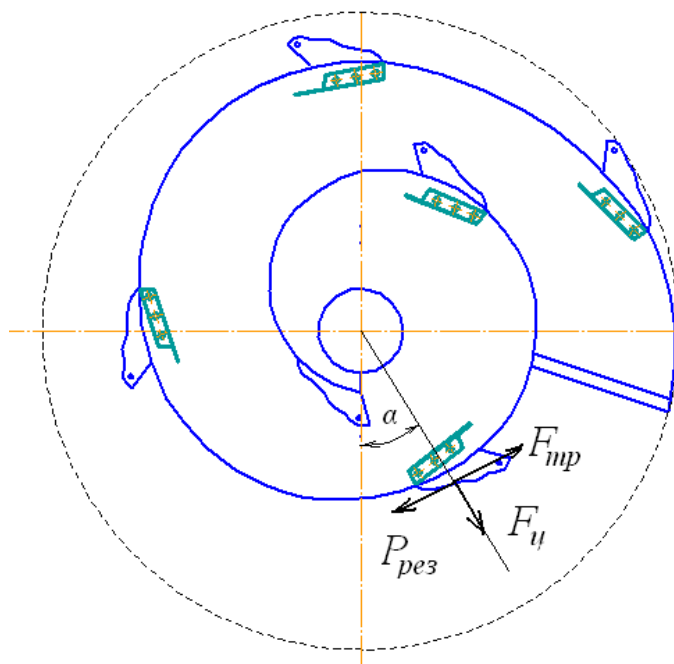


Рисунок 3 – Расчетная схема определения сопротивления на измельчение материала

Мощность при резании материала равна

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n N^{(i)}}{n}, \quad (15)$$

$$N = (N_{\text{изм}} + N_{\text{тр}}) / \eta$$

где  $N_{\text{изм}}$  – мощность затрачиваемая на измельчение, кВт;  $N_{\text{тр}}$  – мощность затрачиваемая на транспортирование материала, кВт;  $\eta$  – КПД трансмиссии от двигателя к валу машины.

$$P_{\text{тр}} = F_1 \cdot \mu$$

$$N_{\text{тр}} = \frac{n^3 \cdot R^2}{\varphi} F_1 (R^2 \cdot \cos \alpha + \mu \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha) \quad (16)$$

## Выводы

Предложенное техническое решение повышает эффективность процесса приготовления кормовых смесей за счет одновременного качественного выполнения двух технологических операций измельчения и смешивания шнековым рабочим органом с дополнительно установленными серповидными сегментами, что в свою очередь снижает время приготовления и энергоемкость рабочего процесса, так как не требуется многократная циркуляция корма в объеме бункера.

Теоретическое обоснование основных конструктивно-технологических параметров позволило:

- получить аналитическую зависимость для определения производительности рабочего органа с двухплоскостными сегментами (6);
- определить мощность, затрачиваемую на процесс измельчения (14).

Разработанные методики позволяют получить в результате расчета оптимальные конструктивно-режимные параметры вертикальных шнековых рабочих органах с измельчающими сегментами достаточные для получения кормов заданного качества.

## Литература

1. Журтов А.Х. К вопросу совершенствования работы кормораздатчиков с вертикальным шнековым рабочим органом / В.Ю. Фролов, Д.П. Сысоев, А.Х. Журтов // Техника и оборудование для села, 2015. – № 4. – С. 40–42.
2. Сысоев Д.П. Режущий элемент измельчителя кормов / Д.П. Сысоев, В.Ю. Фролов // Эффективное животноводство, 2012. – № 5. С. 66.
3. Журтов А.Х. Обоснование кривизны режущей кромки ножа / В.Ю. Фролов, Д.П. Сысоев, А.Х. Журтов // Сельский механизатор, 2015. – № 2. – С. 34–35.
4. Сарбатова Н.Ю. Совершенствование процесса приготовления и раздачи грубых кормов рулонной заготовки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Сарбатова Наталья Юрьевна. – Ставрополь, 2006. – 196 с.
5. Сысоев Д.П. Классификация режущих аппаратов / В.Ю. Фролов, Д.П. Сысоев, О.Л. Брусенцова // Сельский механизатор, 2013. – № 1 (47). – С. 12–13.
6. Фролов В.Ю. Анализ процесса резания длинностебельных кормов сегментом с криволинейной режущей кромкой / В.Ю. Фролов, Д.П. Сысоев, А.Х. Журтов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2014. – № 103. – С. 840–854.

### References

1. Zhurтов А.Н. К вопросу совершенствования работы кормораздатчиков с вертикальным шнековым рабочим органом / В.Ю. Фролов, Д.П. Сысоев, А.Н. Журтов // Техника и оборудование для села, 2015. – № 4. – С. 40–42.
2. Сысоев Д.П. Режущий элемент измельчителя кормов / Д.П. Сысоев, В.Ю. Фролов // Эффективное животноводство, 2012. – № 5. С. 66.
3. Журтов А.Н. Обоснование кривизны режущей кромки ножа / В.Ю. Фролов, Д.П. Сысоев, А.Н. Журтов // Сельский механизатор, 2015. – № 2. – С. 34–35.
4. Сарбатова Н.Ю. Совершенствование процесса приготовления и раздачи грубых кормов рулонной заготовки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Сарбатова Наталья Юрьевна. – Ставрополь, 2006. – 196 с.
5. Сысоев Д.П. Классификация режущих аппаратов / В.Ю. Фролов, Д.П. Сысоев, О.Л. Брусенцова // Сельский механизатор, 2013. – № 1 (47). – С. 12–13.
6. Фролов В.Ю. Анализ процесса резания длинностебельных кормов сегментом с криволинейной режущей кромкой / В.Ю. Фролов, Д.П. Сысоев, А.Н. Журтов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2014. – № 103. – С. 840–854.