

УДК 631.363

**Сергеев Николай Степанович**

докт. техн. наук, профессор,  
профессор кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка,  
и механизация и технология животноводства»  
ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет

**Ерёмин Степан Дмитриевич**

магистрант кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка,  
и механизация и технология животноводства»  
ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет

**Жданов Михаил Владимирович**

магистрант кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка,  
и механизация и технология животноводства»  
ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

## К ОБОСНОВАНИЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ЦЕНТРОБЕЖНО-РОТОРНОМ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ ГРУБО-СТЕБЕЛЬНЫХ КОРМОВ

**Аннотация.** В данной статье рассмотрены возможные пути совершенствования и повышения эффективности процесса измельчения грубо-стебельных кормов в центробежно-роторном измельчителе, а также представлена конструктивно-технологическая схема центробежно-роторного измельчителя.

**Ключевые слова:** Измельчение грубо-стебельных кормов, центробежно-роторный измельчитель, степень измельчения, эффективность процесса измельчения, энергозатраты на измельчение.

**Актуальность темы.** Грубые корма являются основой рациона крупного рогатого скота, но без предварительной обработки они плохо поедаются животными и не в полной мере усваиваются. Помимо этого, обработка позволяет применять их в качестве составляющих кормовых смесей для животных. В процессе приготовления кормов следует учитывать различные технологии и способы их обработки, которые делятся на механические, тепловые, химические, биологические и биохимические. Механический способ получил наибольшее распространение. При таком способе важной операцией является измельчение. Измельчённый корм лучше усваивается животными, что в свою очередь даёт возможность получения высоких показателей их продуктивности и снижения расхода корма [1, 11].

Процесс измельчения – самый важный из этапов приготовления стебельных кормов и комбикормов, который также является одним из наиболее энергоёмких и трудоёмких процессов. В статье предложена схема конструкции центробежно-роторного измельчения грубо-стебельных кормов и дана эмпирическая формула по определению рационального количества режущих элементов рабочих органов на первой ступени измельчения.

Измельчители сена и соломы являются важными агрегатами на животноводческой ферме. Для измельчения стебельных кормов в нашей стране и за рубежом, например, в Германии, Франции, США, применяют различные машины, которые можно разделить на три группы: ножевые, которые измельчают материал по принципу резания (РСС-6, ГН 500); штифтовые, разрушающие материал путём разрыва и расщепления (ИГК-30Б, Р 48 М); и молотковые (ИРТ-



165), измельчающие стебельный корм при помощи удара и истирания [2]. Рассматриваемые машины обладают своими достоинствами и недостатками. Принципиальные схемы, технические характеристики, а также достоинства и недостатки основных машин приведены в табл. 1.

Таблица 1

Машины для измельчения стебельных кормов

Измельчитель	Схема	Тип измельчающего аппарата / принцип измельчения	Технические характеристики	Преимущества / недостатки
РСС-6	 1 – нож; 2 – противорежущая пластина; 3 – измельчаемый материал	Ножовой / резание со скольжением	$N_{уст} = 17 \text{ кВт}$ $Q_{гк} = 1,8 \text{ т/ч}$ $Q_{жк} = 7,6 \text{ т/ч}$ $N_{хл гк} = 9,4 \text{ кВт ч/т}$ $N_{хл жк} = 2,2 \text{ кВт ч/т}$	Малый удельный расход энергии, возможность измельчения кормов различной влажности / уязвимость ножей от попадания инородных предметов, постоянный контроль за состоянием режущей пары
ИГК-30Б	 1 – неподвижный диск; 2 – подвижный диск; 3 – штифты	Штифтовый / излом, разрыв, расщепление вдоль волокон	$N_{уст} = 30 \text{ кВт}$ $Q_{гк} = 2,3 \text{ т/ч}$ $Q_{жк} = -$ $N_{хл гк} = 13,0 \text{ кВт ч/т}$ $N_{хл жк} = -$	Простота, надежность, измельчение стеблей не только поперек, но и вдоль волокон / невозможность измельчения влажного корма, высокая удельная энергоемкость
ИРТ-165	 1 – молотковый ротор; 2 – дека; 3 – цепная передача; 4 – загрузочный бункер; 5 – щиток; 6 – выгрузное устройство	Молотковый / удар, разрыв, истирание	$N_{уст} = 132 \text{ кВт}$ $Q_{гк} = 5,6 \text{ т/ч}$ $Q_{жк} = 16 \text{ т/ч}$ $N_{хл гк} = 23 \text{ кВт ч/т}$ $N_{хл жк} = 8,25 \text{ кВт ч/т}$	Высокая производительность, простота регулировок, универсальность / высокая энергоемкость процесса, постоянный контроль за состоянием решета

Иной принцип работы заложен в центробежно-роторных измельчителях фуражного зерна ИЛС, разработанных в Южно-Уральском аграрном университете [5, 6, 7]. Данные измельчители обладают низкой удельной энергоемкостью (3-5 кВт·ч/т) с получением равномерного гранулометрического состава готового продукта. Модуль помола можно регулировать в зависимости от вида животного, для которого приготавливается кормосмесь. Еще одним из плюсов является эффект перемешивания материала, то есть при одновременной загрузке более двух различных сыпучих компонентов получается качественная гомогенная смесь, что позволяет отказаться от последующего использования смесителей [3].

Таким образом, предлагается применить такой способ измельчения стебельных кормов для приготовления кормов для сельскохозяйственных животных.

**Цель исследований.** Поиск возможных путей совершенствования и повышения эффективности технологического процесса измельчения грубо-стебельных кормов в измельчителе центробежно-роторного типа при обеспечении зоотехнически требуемого качества готового продукта.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Произвести обзор и анализ теоретических исследований основных способов и машин по измельчению грубо-стебельных кормов.
2. Предложить и обосновать конструктивно-технологическую схему центробежно-роторного измельчителя.

3. Разработать классификационную схему основных факторов, влияющих на эффективность работы центробежно-роторного измельчителя стебельных кормов.

4. Теоретически обосновать основные конструкционно-технологические параметры рабочих органов измельчителя.

#### **Объект исследований**

Технологический процесс взаимодействия измельчающих элементов рабочих органов центробежно-роторного измельчителя стебельных кормов с перерабатываемым сырьем.

#### **Предмет исследований**

Закономерности и условия функционирования центробежно-роторных измельчителей грубо-стебельных кормов, имеющих оригинальные рабочие органы, позволяющие измельчать исходный материал с минимальным расходом энергии.

#### **Научная гипотеза**

Возможность измельчения грубо-стебельного корма в центробежно-роторных аппаратах кромками режущих и противорежущих элементов рабочих органов с учетом угла защемления в зоне резания. Таким образом можно снизить энергоёмкость процесса измельчения и повысить качество (снизить количество переизмельчённой фракции) готового продукта, соответствующего зоотехническим требованиям.

**Материалы и методы.** По результатам проведенных нами исследований по измельчению стебельных и сочных кормов в соломорезках и корнеклубнерезках, в частности в центробежных механизмах, представляется возможным обосновать принципиальную технологическую схему центробежно-роторного измельчителя стебельных кормов и определить основные факторы, влияющие на эффективность его работы.

На эффективность работы центробежно-роторного измельчителя существенное влияние оказывают следующие факторы: технологические, механические, конструктивные. Более подробно эти факторы представлены на схеме (рисунок 1).



Рисунок 1 – Факторы, влияющие на эффективность работы центробежно-роторного измельчителя стебельных кормов

При проектировании машин для выполнения полноценного процесса измельчения немаловажное значение имеют конструкционные параметры рабочих органов.

Процесс резания представляет собой частный вид измельчения стеблей кормов растительного происхождения, который подчиняется общим законам разрушения материалов под действием внешних сил, превосходящих силы молекулярного сцепления. Закономерности влияния данных сил зависят от физико-механических свойств измельчаемого материала и материала из которого изготовлены рабочие органы, а также от скорости взаимодействия.

Немаловажное значение имеют общий вид и параметры конструкции рабочих органов измельчающих машин, схема подачи измельчаемого материала в зону измельчения и отвода готового продукта. На рисунке 2 представлена схема центробежно-роторного измельчителя стебельных кормов.

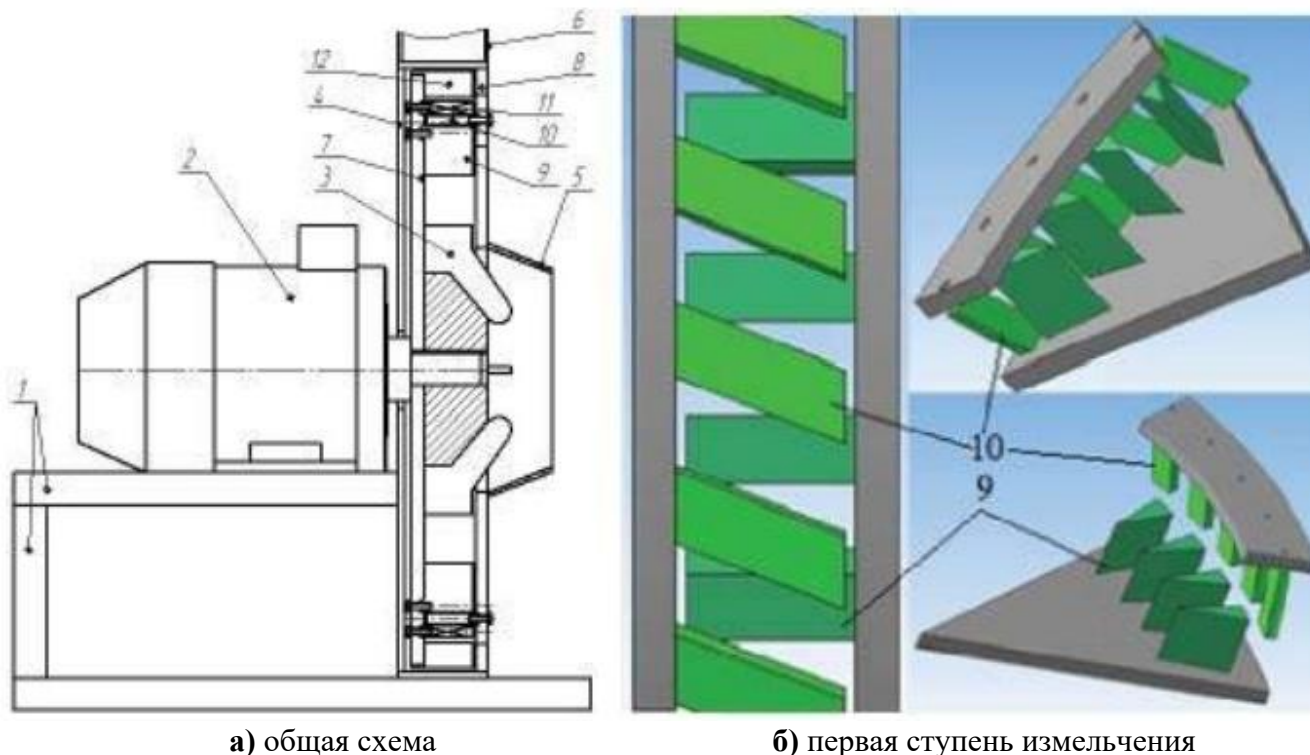


Рисунок 2 – Центробежно-роторный измельчитель стебельных кормов:

- 1 – рама; 2 – электродвигатель; 3 – подающая крыльчатка; 4 – корпус измельчителя;
- 5 – приёмная камера; 6 – выгрузное окно-эжектор; 7 – диск-ротор; 8 – диск-дефлектор;
- 9 – направляющий штифт-нож первой ступени измельчения;
- 10 – измельчающий штифт-нож первой ступени измельчения;
- 11 – измельчающие элементы второй ступени измельчения; 12 – лопатки.

Технологический процесс измельчения выполняется следующим образом. В приемную камеру 5 подается исходный материал, который подхватывается лопастями подающей крыльчатки 3 и за счет центробежных сил перемещается к каналам направляющих штифт-ножей 9 первой ступени измельчения, где после предварительного уплотнения происходит резка корма на заданную длину при помощи измельчающих штифт-ножей 10. Значительное влияние на процесс измельчения оказывает ориентация стебля в канале рабочего органа по отношению к кромкам режущих элементов. Далее измельченный корм подвергается дополнительному расщеплению на второй ступени измельчения, после чего осуществляется аэродинамическая выгрузка готового продукта лопатками 12 и дальнейшая транспортировка в эжекторе.



По теории резания основоположника земледельческой механики В.П. Горячкина, для технологического процесса основными параметрами являются давление ножа (режущего элемента) на материал и боковое его движение. Количественное соотношение между двумя этими параметрами характеризуется значениями коэффициента скольжения и коэффициента трения лезвия ножа (кромки режущего элемента) о разрезаемый материал. При этом следует отметить важную роль угла защемления  $\chi$ . Угол защемления  $\chi$  – это угол между кромкой режущего элемента в зоне резания и рабочей кромкой противорежущего элемента, при котором измельчаемый материал прекращает свое движение и начинается его перерезание. Если такое условие не соблюдается и режущие элементы параллельны между собой, то есть отсутствует угол защемления, такой способ резания принято называть «рубка». С увеличением угла защемления угол трения материала о нож или противорежущую пластину должен быть равен меньшему углу трения. Полное защемление материала в режущей паре наступает при условии  $\chi = 2\phi_{\min}$ , где  $\phi$  – угол трения измельчаемого материала. Допустимую величину угла защемления определяют опытным путем при разного рода условиях (тип режущего инструмента, его острота, физико-механические свойства измельчаемого материала и т.п.) [4, 8, 9, 10].

К конструкционным параметрам смежной режущей пары измельчающих элементов рабочих органов первой ступени измельчения центробежно-роторного измельчителя относятся  $\beta$  – угол заточки режущего элемента (режущее ребро пуансона);  $\beta_1$  – противорежущий угол стенки канала;  $a$  – толщина режущего элемента;  $\delta$  – острота ребра режущего элемента;  $\nu = \phi + \beta = 90^\circ$  – угол резания;  $\Delta S$  – зазор между режущим и противорежущим элементами,  $z_1'$  – ширина канала на выходе;  $h'$  – высота канала;  $z_2'$  – ширина канала на входе,  $\chi$  – угол защемления. (рисунок 3).

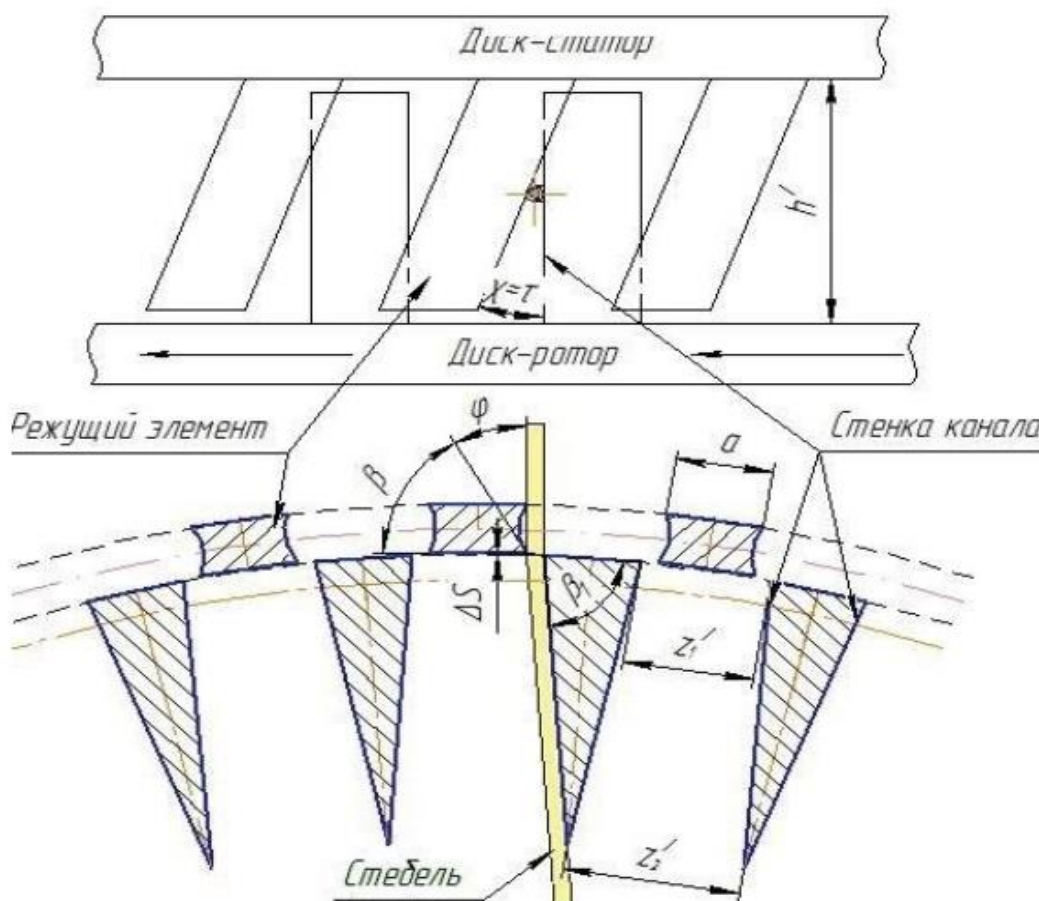


Рисунок 3 – Схема конструктивных параметров режущей пары первой ступени измельчения.

В процессе скользящего резания нож легче проникает в материал благодаря тому, что микровыступы на его лезвии оказывают эффект перепиливания. Микровыступы лезвия ножа захватывают волокна материала, вследствие чего между смещаемыми и соседними волокнами в материале возникают напряжения растяжения и сдвига, для которых предел прочности меньше, по сравнению с деформацией сжатия, вызываемой действием нормальной силы. Угол скольжения играет исключительно важную роль в процессе резания. Резание «со скольжением» менее энергозатратно по отношению к резанию «рубкой», вследствие этого расходуемая мощность аппарата используется наиболее эффективно [8, 9, 10].

Длина резки является одним из важнейших показателей качества готового продукта при измельчении стебельных кормов. Она представляет собой не что иное, как путь, пройденный измельчаемым материалом с момента перерезания до момента последующего контакта с режущим элементом, и зависит от количества измельчающих элементов, а также от их конструктивных размеров и окружной скорости диска-ротора [3, 12].

Необходимое количество режущих элементов определяется по формуле:

$$Z = \frac{2\pi R}{vt_{cp} + (a+d)} \quad (1)$$

где  $R$ -наружный радиус первого ряда рабочих органов, м;

$v$ -окружная скорость диска-ротора, м/с;

$a$  – толщина режущего элемента, м;

$d$ - диаметр поперечного сечения измельчаемого материала, м;

$t_{cp}$ -время движения стебля вдоль стенки подающего канала диска-ротора между окончанием предыдущего и началом последующего контакта с режущим элементом, которое определяется по формуле:

$$t = \frac{l}{\omega} \ln \left( \frac{R+l+\sqrt{(R+l)^2-R^2}}{R} \right) f K_v \quad (2)$$

где  $\omega$ -угловая скорость диска-ротора, с<sup>-1</sup>;

$l$ -длина резки, м;

$f$ -коэффициент трения материала о металл;

$K_v$ -коэффициент неравномерности, учитывающий изменение скорости движения стебля по каналу.

## ВЫВОДЫ:

1. Произведен обзор и анализ основных машин и оборудования по измельчению стебельных кормов.
2. Предложена конструктивно-технологическая схема центробежно-роторного измельчителя грубо-стебельных кормов.
3. Разработана классификационная схема основных факторов, влияющих на эффективность работы центробежно-роторного измельчителя стебельных кормов.
4. Предложена эмпирическая формула по определению рационального количества режущих элементов рабочих органов на первой ступени измельчения в зависимости от длины резки, толщины режущих элементов, скорости и времени движения стебля в канале рабочих органов между окончанием предыдущего и началом последующего контакта с режущим элементом.

## Список литературы:

1. Мельников С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. Л.: Колос, 1978. 560 с.
2. Журнал "Сельское хозяйство за рубежом", № 1, 1983.
3. Сергеев Н. С. Центробежно-роторные измельчители фуражного зерна: дис. д-ра техн. наук. Челябинск, 2008. Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/tsentrobezhno-rotornyeizmelchitelifurazhnogo-zerna>



4. Горячкин В. П. Собрание сочинений. Изд. 2-е. М.: Колос, 1968. Т. 2. 455 с.
5. Сыроватка В. И., Сергеев Н. С. Обоснование рабочих органов измельчителей семян рапса и фуражного зерна на базе «Земледельческой механики» В. П. Горячкина // Техника в сельском хозяйстве. М., 2008. № 2. С. 30–34.
6. Сыроватка В. И., Сергеев Н. С. Изыскание энергосберегающих рабочих органов для измельчения семян рапса и фуражного зерна // Вестник Всерос. науч.-исслед. института механизации животноводства. М., 2008. Т. 18. № 3. С. 3–12.
7. Сергеев Н. С. Влияние конструкционных параметров режущих элементов на статическое и динамическое усилие резания зерна // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2008. № 1. С. 36–37.
8. Желиговский В. А. Экспериментальная теория резания лезвием // Тр. МИМЭСХ. М., 1940. Вып. 9. 27 с.
9. Резник Н. Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. М.: Машиностроение, 1975. 312 с.
10. Сабликов В. М. О критической величине угла защемления // Механизация и электрификация соц. сельского хозяйства. 1963. № 2. С. 44. 166
11. Белянчиков Н. Н. Механизация животноводства. М.: Колос, 1970.
12. Сергеев Н.С., Судаков К.В. Особенности конструкции центробежно-роторного измельчителя стебельных кормов. // Материалы I международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству» / под ред. докт. техн. наук, проф. Н. С. Сергеева. – Челябинск: ЧГАА, 2011. – Ч. III. – 227 с.

