

## ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ГРУБЫХ СТЕБЕЛЬНЫХ КУЛЬТУР

**В.П. Чеботарев,**

*профессор каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, докт. техн. наук, профессор*

**Г.А. Радишевский,**

*доцент каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, канд. техн. наук, доцент*

**Н.П. Гурнович,**

*доцент каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, канд. техн. наук, доцент*

**Д.А. Яновский,**

*ст. преподаватель каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ*

**А.А. Зенов,**

*ст. преподаватель каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ*

**Д.Н. Бондаренко,**

*ст. преподаватель каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ*

**А.А. Лаппо,**

*магистрант БГАТУ*

*В статье проведен анализ конструкций измельчающих аппаратов кормоуборочных машин и факторов, оказывающих влияние на энергоемкость процесса измельчения растительной массы. Приведена зависимость, устанавливающая влияние факторов на энергоемкость процесса измельчения, а также определен оптимальный режим работы измельчающего аппарата из условия минимальных затрат энергии на выполнение технологического процесса.*

*Ключевые слова: измельчающий аппарат, режимы резания, угол скольжения, кормоуборочный комбайн, кукуруза.*

*The article presents an analysis of the structures of forage harvesters chopping devices and factors influencing the energy intensity of plant mass chopping process. The dependence establishing the influence of factors on the energy intensity of the chopping process is presented, and the optimal operating mode of the chopping device is determined from the condition of minimal energy costs for the implementation of the technological process.*

*Key words: chopping device, cutting modes, sliding angle, forage harvester, corn.*

### Введение

В агропромышленном комплексе (АПК) Республики Беларусь отрасль животноводства занимает важное место в производстве сельскохозяйственной продукции. Эффективность отрасли животноводства зависит от производства сбалансированных по белку кормовых смесей, в состав которых входят грубые стебельные корма на основе кукурузы, содержащие питательные легкоусвояемые вещества, необходимые для организма жвачных животных.

В структуре кормовых смесей доля грубых стебельных кормов при производстве молока составляет 50-55 %, говядины – 65-70 %, свинины и птицы – 70-80 %. Важная роль в структуре производства грубых стебельных кормов принадлежит сенажу и силосу. В Республике Беларусь для производства силоса и сенажа (в среднем около 20 млн т в год) основной сельскохозяйственной культурой является кукуруза.

Ценность кукурузы как исходного материала для получения сенажа и силоса состоит в ее питательности, благодаря морфологическим частям растений. Так, в период цветения в 1 кг зеленой массы кукурузы содержится 1,69 МДж, в фазе молочной спелости зерна – 2,05 МДж, молочно-восковой – 2,34 МДж, восковой – 2,96 МДж, а в стадии молочной спелости 1 кг початков содержится 2,34 МДж, молочно-восковой – 3,65 МДж, восковой – 5,64 МДж. Кроме того, листостебельная масса кукурузы в фазе восковой спелости состоит в основном из клетчатки с низкой переваримостью, которая необходима при кормлении крупного рогатого скота [1].

Одним из факторов, оказывающих влияние на качество корма, является измельчение, которое относится к энергоемким процессам. Поэтому проблема снижения энергоемкости процесса измельчения грубых стебельных растений является актуальной и спо-

способствует повышению эффективности производства продукции животноводства за счет снижения себестоимости кормов.

Проблемам энергоемкости процесса измельчения растений большое внимание уделяли В.П. Горячкин, Н.Е. Резник, В.А. Желиговский, В.Н. Демченко, Л.Е. Бестаев и другие [2-6].

Целью данной работы является установление влияния физико-механических свойств грубых стебельных растений и параметров режущего инструмента на энергоемкость процесса измельчения.

### Основная часть

Измельчение растений является основной операцией, выполняемой кормоуборочными машинами. Исследователи, занимающиеся процессом измельчения, установили, что качество кормов, заготовленных с помощью измельчающего аппарата кормоуборочных машин, зависит от соответствия длины резки агротехническим требованиям по качеству измельчения (массовой доли фракций частиц в заданном диапазоне длины резки) [5, 6].

В настоящее время для измельчения растительной массы применяются различные по конструктивному исполнению измельчающие аппараты кормоуборочных машин. Широкое распространение получили такие измельчающие аппараты, как роторный, дисковый и барабанный (цилиндрический).

Роторный аппарат применяется в косилке-измельчителе «ПОЛЕСЬЕ 1500» (ОАО «Гомсельмаш»), который осуществляет измельчение безподпорным срезом растений (рис. 1а) [7]. Благодаря шарнирному креплению ножей, на валу ротора обеспечивается высокая надежность выполнения технологического процесса среза и измельчения. Однако одним из недостатков этого аппарата является невозможность обеспечения изменения длины резки растений и загрязнение корма почвой из-за ее захвата ножами.

Дисковый измельчающий аппарат (рис. 1б), используемый в кормоуборочном комбайне КПК-3000, обеспечивает резку зеленой массы с регулируемой длиной [7]. Достоинством данного измельчающего аппарата является применение ножей прямолинейной формы, что упрощает изготовление и заточку, а недостатком является непостоянство угла защемления зеленой массы

между ножом и противорежущей пластиной, что способствует скольжению измельчаемой массы вдоль лезвия и сгуживанию ее у края питающего окна, а также непостоянство крутящего момента в приводе.

Наиболее широкое применение получили барабанные (цилиндрические) измельчающие аппараты: плосконожевой (рис. 1в) [8] и с винтообразными ножами (рис. 1г) [9]. В зависимости от назначения барабанные аппараты изготавливаются в двух вариантах: измельчающе-швыряющие и измельчающие. Измельчающе-швыряющий аппарат обеспечивает одновременно с измельчением транспортирование массы в транспортное средство. При использовании измельчающего аппарата для транспортирования измельченной массы дополнительно применяется доизмельчающее устройство с ускорителем выброса.

Достоинством плосконожевого барабанного измельчающего аппарата по сравнению с дисковым, является то, что ножи устанавливаются в несколько рядов с перекрытием. В результате этого происходит защемление растений под углом меньше угла трения (режим резки с продольным перемещением без скольжения), что обеспечивает постоянство нагрузки в приводе режущего аппарата. Недостаток плосконожевого аппарата заключается в неравномерности резки по длине.

Барабанные измельчающие аппараты с винтообразными ножами более эффективны по сравнению с плосконожевыми измельчающими аппаратами, так как в них сохраняется постоянный угол защемления растительной массы, что обеспечивает равномерную длину резки и меньшую энергоемкость процесса измельчения. Недостатком измельчающих аппаратов с винтообразными ножами является сложность изготовления, заточка и регулировка.

С учетом тенденций развития конструкций измельчающих аппаратов, в кормоуборочных комбайнах для измельчения грубых стебельчатых кормов наиболее эффективным является барабанный тип рабочего органа, так как он согласуется с питающим устройством и позволяет эффективно применять прямолинейные ножи, установленные в несколько рядов и обеспечивающие постоянство угла защемления растительной массы.

Факторами, определяющими энергоемкость процесса резания растений, являются физико-

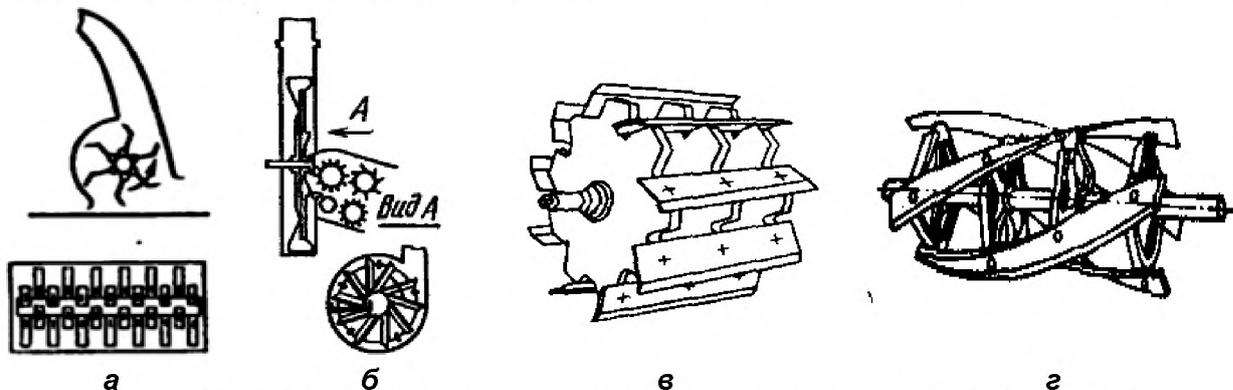


Рисунок 1. Конструктивные схемы измельчающих аппаратов: а – роторный; б – дисковый; в – плосконожевой барабанный; г – барабанный с винтообразными ножами

механические свойства культуры, режим резания и геометрические параметры режущего аппарата.

Физико-механические свойства культур, используемых для кормления животных, характеризуются размерными параметрами и прочностными свойствами растений. На работу измельчающего аппарата наибольшее влияние оказывает толщина стебля и состояние листовенной части растений.

По данным Особова В.И. [10], минимальный диаметр стеблей кукурузы на высоте 15 см от поверхности почвы (высота среза) составляет 14...15 мм, а максимальный – 35...40 мм, длина – от 140 мм до 269 мм.

По данным Резника Н.Е. [3], диаметр стеблей составляет 15...40 мм, а высота стеблей – до 4 м при удельной работе резания от 0,006 до 0,240  $H \cdot м/см^2$ .

Технологический процесс измельчения растительного материала под воздействием режущей кромки лезвия состоит из предварительного сжатия до возникновения контактного разрушающего напряжения и процесса резания.

На процесс резания расходуется до 50 % от всех затрат на выполнение технологического процесса измельчения растительных остатков. Факторами, влияющими на энергоёмкость процесса резания растительного материала, являются скорость резания и геометрические параметры режущей пары [1].

Скорость резания ( $V$ ) является основным фактором, оказывающим влияние на энергоёмкость процесса измельчения. Для обеспечения резания необходимо, чтобы направление точек режущей кромки ножа отклонялось на угол  $\xi < \varphi$  (рис. 2) [11; 15]. В этом случае сила нормального давления  $N$  раскладывается на две составляющие:  $N_T$  и  $N_V$ . Сила  $N_T$  направлена вдоль лезвия, но она не вызывает скольжения растительной массы, так как численное значение ее меньше силы трения  $F$ , что обеспечивает равномерность нагрузки на режущую кромку и в приводе измельчающего барабана (рис. 2).

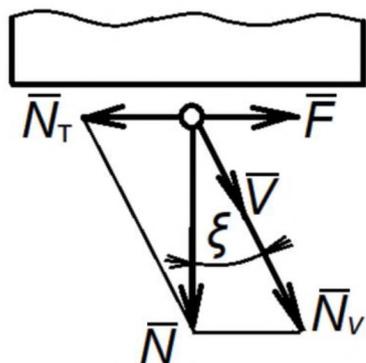


Рисунок 2. Режим резания растительной массы без скольжения вдоль лезвия

Одним из условий снижения усилия, затрачиваемого на резание растений в режущем аппарате, является резание без скольжения растительного материала вдоль лезвия.

$$0 < \xi < \varphi,$$

где  $\xi$  – угол между направлением скорости перемещения лезвия и нормалью к его поверхности, град.;  
 $\varphi$  – угол трения растительных материалов о лезвие, град.

На энергоёмкость процесса резания также оказывают влияние геометрические параметры ножа: угол заточки и толщина лезвия.

Угол заточки – это угол, образованный фасками лезвия у его режущей кромки, измеряемый в плоскости, перпендикулярной к кромке. Установлено, что с увеличением угла заточки ножа удельная работа резания возрастает и, следовательно, энергоёмкость процесса измельчения увеличивается [16].

Угол заточки должен быть минимальным, однако в процессе резания вершина ножа приобретает закругленную поверхность (в поперечном сечении – форму дуги), поэтому при рассмотрении процесса резания необходимо исходить из представления, что лезвие будет иметь определенную толщину. В современных измельчающих аппаратах угол заточки находится в пределах 12...22°.

При резании, когда лезвие внедряется в измельчающий материал вместе с фасками ножа, резко возрастает энергоёмкость процесса измельчения за счет увеличения толщины лезвия и возрастает усилие, необходимое для обеспечения резания растений [12].

В результате исследований, проведенных на кафедре сельскохозяйственных машин Белорусского государственного аграрного технического университета, установлено, что усилие перерезания стебля кукурузы находится в пределах от 0,53 до 2,02  $H$  в зависимости от диаметра стебля (рис. 3).

Из анализа результатов проведенных исследований следует, что с увеличением влажности возрастает усилие, затрачиваемое на перерезание стебля.

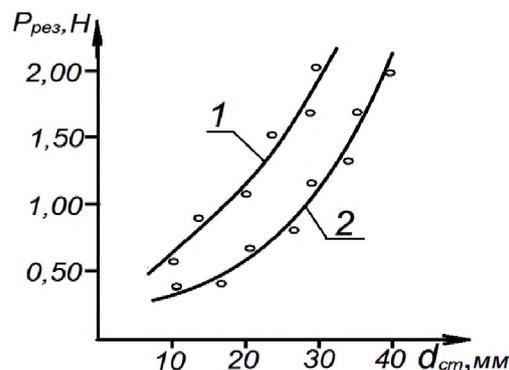


Рисунок 3. Зависимость усилия перерезания от диаметра стебля (высота резания  $h_{ср} = 0,25$  м):  
1 – влажность стебля  $W = 82\%$ ; 2 – влажность стебля  $W = 86\%$

Для оценки влияния на энергоёмкость процесса измельчения  $\mathcal{E}_и$  (кВт·ч/т) зеленой массы оборотов  $n$  измельчающего барабана (об/мин) и подачи массы в измельчающий аппарат –  $q$  (кг/с) был проведен двухфакторный эксперимент [13, 14]. Уровни и значения факторов приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Значение факторов в кодированном и натуральном виде**

Факторы	Обозначение	Интервал варьирования	Уровни факторов		
			-1	0	+1
Обороты, об/мин.	$n$	50	950	1000	1050
Подача массы, кг/с	$q$	7	18,0	25	32,0
Функция отклика	$\mathcal{E}_u$ – энергоёмкость процесса измельчения, кВт·ч/т				

Для обработки полученных опытных данных использовались программы *Statistica 8 for Windows* и *Mathcad 15*, при помощи которых были определены коэффициенты регрессии, по которым составлена математическая модель по критерию оптимизации как функций откликов от  $n$  и  $q$ .

Обработка экспериментальных данных позволила получить адекватную регрессивную модель, описывающую влияние оборотов измельчающего барабана и подачи зеленой массы на энергоёмкость процесса измельчения.

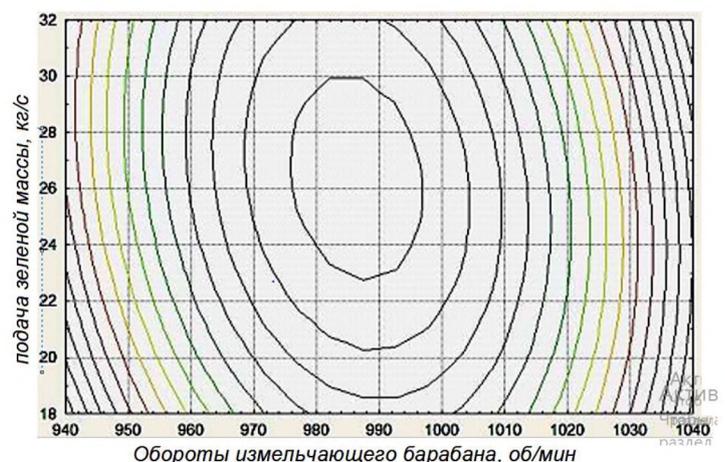
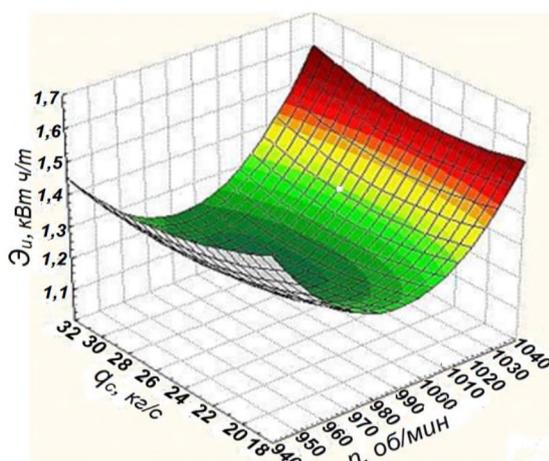
$$\mathcal{E}_u = 123,65135 - 0,57284 n + 0,00017 n^2 - 94,12000 q + 113,00610 \cdot q^2 + 0,069461 n q.$$

На рисунке 4 представлена поверхность отклика энергоёмкости процесса измельчения от оборотов измельчающего барабана и подачи зеленой массы.

Анализ поверхности отклика и ее двухмерного сечения для  $\mathcal{E}_u = f(n, q_c)$  показал:

– наибольшее влияние на энергоёмкость процесса измельчения оказывает подача зеленой массы в измельчающий аппарат, о чем свидетельствует максимальный коэффициент регрессии;

– минимальная удельная энергоёмкость процесса измельчения обеспечивается  $\mathcal{E}_u = 0,92$  кВт·ч/т при частоте вращения измельчающего барабана  $n = 960 \dots 1015$  об/мин. и подачи зеленой массы  $q = 22 \dots 30$  кг/с.



**Рисунок 4. а – поверхность отклика; б – двухмерное сечение**

**Заключение**

1. Измельчение кукурузы, используемой для приготовления грубых кормов, целесообразно производить при помощи аппарата, состоящего из барабана с прямыми ножами, установленными под углом  $\xi < \phi$  по отношению к противорезущему брусу, что обеспечивает равномерную загрузку режущей кромки ножей.

2. Следует использовать режим резания растительной массы без скольжения вдоль режущей кромки лезвия, так как при этом обеспечиваются минимальные затраты энергии на выполнение технологического процесса.

3. Оптимальным диапазоном частот вращения измельчающего барабана является  $n = 850 \dots 1015$  об/мин., при котором удельная энергоёмкость процесса измельчения составляет 0,92 кВт·ч/т.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Радишевский, Г.А. Измельчающие аппараты кормоуборочных машин / Г.А. Радишевский, Н.П. Гурнович, А.А. Лапо // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Международ. науч.-практ. конф., г. Минск, 16-17 октября 2024 г./ Белорус. гос. аграрн. техн. ун-т; редкол.: Н.Н. Романюк (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2024. – Ч. 1. – С. 72-74.

2. Горячкин, В.П. Собрание сочинений: в 3 т. / В.П. Горячкин; под ред. Н.Д. Лучинского. – М.: Колос, 1965. – Т. 3. – 364 с.

3. Резник, Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов / Н.Е. Резник. – М.: Машиностроение, 1975. – 312 с.

4. Желиговский, В.А. Экспериментальная теория резания лезвием / В.А. Желиговский // Труды МИМЭСХ. – М., 1940. – Вып. 9. – С. 1-28.

5. Демченко, В.Н. Повышение эффективности

процесса измельчения грубых и стебельчатых кормов / В.Н. Демченко, А.А. Вертий // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2011. – № 1-3. – С. 74-79.

6. Бестаев, Л.Е. Комплексная оценка показателей качества измельчения стебельчатых кормов / Л.Е. Бестаев // Инновации в сельском хозяйстве. – 2014. – № 2. – С. 49-53.

7. ОАО «Гомсельмаш»: [сайт]. – Республика Беларусь: Гомель, 2025. – URL: <https://www.gomselmash.by> (дата обращения: 28.04.2025).

8. Jhn Deere: [USA, Ilnos], 2025. – URL: <https://www.deere.com> (date of access: 28.04.2025).

9. Nev Holland: [Global Web Site], 2025. – URL: <https://www.newholland.com> (date of access: 28.04.2025).

10. Особов, В.И. Механическая технология кормов / В.И. Особов. – М.: Колос, 2009. – 344 с.

11. Кленин, Н.И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины: Элементы теории рабочих процессов, расчет регулировочных параметров и режимов работы / Н.И. Кленин, В.А. Сакун. – М.: Колос, 2008. – 816 с.

12. Белов, М.И. Методика расчета длины резки растений кормоуборочными комбайнами: роторным и двойного измельчения / М.И. Белов // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29. – № 2. – С. 279-294.

13. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

14. Хайлис, Г.А. Исследование сельскохозяйственной техники и обработки опытных данных / Г.А. Хайлис, М.М. Ковалев. – М.: Колос, 1994. – 169 с.

15. Маликов, Г.И. Определение углов скольжения лезвия в процессе опорного резания / Г.И. Маликов, В.Ф. Кондрашов // Ученые записки Петрозаводского гос. ун-та. – 2012. – № 8 (129). – С. 40-42.

16. Патент РФ 131163, G 01M 7/08/ (2013). Стенд для исследования параметров процесса резания лезвием: № 2013113203/28; заявлено 25.03.2013; опубл. 10.08.2013 / Т.А. Гаврилов, В.Ф. Кондрашов, Е.А. Тихонов; заявитель КубГАУ. – 7 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 26.05.2025

## Навесной оборотный плуг ПНО-3-40/55



Плуг навесной оборотный ПНО-3-40/50 предназначен для гладкой вспашки старопахотных не засоренных камнями почв с удельным сопротивлением до 0,09 МПа. Плуг агрегируется с тракторами класса 2,0 («Беларус 1221»).

Преимущества разработки:

- регулируемая ширина захвата;
- цена на 30-40% ниже зарубежных аналогов.

*Производство плугов освоено на ДП «Минотровский ремонтный завод».*

*В 2010 году на сельскохозяйственной выставке в г. Москве плуг удостоен золотой медали.*

### Основные технические данные

Тип.....	навесной
Тип корпуса.....	полувинтовой
Производительность за 1 ч сменного времени, га.....	0,65...1,14
Конструкционная ширина захвата корпуса, мм.....	400/450/500/550
Рабочая скорость движения на основных операциях, км/ч.....	7...9
Масса плуга конструкционная, кг.....	не более 1150
Конструкционная ширина захвата плуга, м.....	1,20/1,35/1,50/1,65