

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ КОРМОВ

Вячеслав Анатольевич Гулевский¹
Александр Анатольевич Вертий²

¹Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

²Краснолучский горно-промышленный колледж

Качество кормовых смесей зависит от их предварительного эффективного измельчения до уровня, определенного зоотехническими требованиями. При этом следует обеспечить минимальную затратность процесса измельчения корма. Большинство предлагаемых промышленностью измельчителей не являются универсальными и имеют высокую энергоемкость процесса. В этой связи актуальной задачей является разработка более эргономичного и универсального устройства для измельчения кормов. Представлено математическое моделирование работы предлагаемого авторами устройства для измельчения кормов. Проанализирована стохастическая и аналитическая модели процессов, происходящих при резке стеблей. Показано, что производительность максимальна, если угол скольжения не превышает 40–45°. Такой режим резания соответствует поперечной разделке стебля. Энергетическая эффективность, как функция от динамических характеристик рабочего органа, пространственного положения стебля, числа оборотов, распределения нагрузки со стороны подаваемого материала и подачи, является максимальной, если угол резки не превышает 35–40°. В этом случае рубка стебля преобладает над резкой. Эти условия обеспечиваются максимальным уплотнением биомассы при продольном расположении стеблей, их минимальной влажностью и способами укладки, геометрий рабочего органа в статике (конфигурация ножей и т. п.) и динамике (углы резки и скольжения). Большое влияние на энергетическую эффективность также оказывает взаимодействие рабочего органа и стебля на локальном уровне, которое определяет способность одновременно всеми ножами отсекать или отрезать часть от суммарного поперечного сечения стебля. Как следствие, повышаются производительность агрегата и оптимальное взаимодействие режущего рабочего органа и прижимного транспортера, которое не может адаптивно изменяться в процессе работы по причине нестабильности свойств подаваемого на измельчение грубого или сочного стебельчатого материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стебельчатые корма, измельчитель кормов, комбинированные ножи, производительность работы, энергоемкость резки стеблей.

MATHEMATICAL MODELING OF FORAGE CUTTER OPERATION

Vyacheslav A. Gulevsky¹
Alexander A. Vertij²

¹Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

²Krasnyi Luch Mining and Industrial College

The quality of feed mixtures greatly depends on the effective cutting to the level specified by requirements of regulatory documents concerning agricultural animals' feeding and nutrition, and at the same time the process of feed raw material cutting should be the least expensive. Most of commercial forage cutters are not universal, and are characterized by high energy consumption. From this perspective, designation of universal and ergonomic device for feed cutting received priority. The paper discusses mathematical modeling of the process of functioning of feed-cutting unit proposed by the authors. The stochastic and analytical models of the processes occurring during stem cutting have been analyzed. It was defined that the maximum efficiency could be achieved at the minimum values of the slip angle (less than 45°), which corresponds mainly to cross-cutting of the stem. Energy efficiency, as a function of the dynamic characteristics of the working elements, spatial stem positioning, number of rotations, distribution of forces from the side of the cutting material and feed, is maximum, if the cutting angle does not exceed 35–40°. In this case, mincing of the stem prevails over cutting. These conditions are provided by the maximum compaction of biomass at the longitudinal positioning of the stems, by their minimum moisture, by methods of arrangement, by the geometry of the working body in statics (i.e. configuration of knives, etc.) and dynamics (i.e. cutting and sliding angles). Great influence on the energy efficiency is also provided by the interaction of the working body and the stem at the local level, which determines the ability of all the knives to chop off or to cut off a part of the total cross-sectional area of the stem. As a consequence, on the energy

efficiency exert an impact unit capacity and the optimal interaction of the cutting working body and the clamping conveyor, which can not be adaptively changed during operation due to the instability of the properties of the coarse forage or succulent stalk material fed to cutting.

KEYWORDS: staked feed, feed cutter, combination knives, energy efficiency, energy consumption of the cutting.

Введение

Необходимым условием повышения продуктивности животноводства является обеспеченность кормами высокого качества. Эффективность кормовых смесей зависит от их перевариваемости и подготовки к скармливанию, что невозможно без измельчения до уровня, определенного зоотехническими требованиями. При этом следует учитывать затратность техпроцесса измельчения корма.

Большинство предлагаемых промышленностью измельчителей не являются универсальными и имеют высокую энергоемкость процесса [1, 2]. В статье представлены результаты этапа исследований, которые ведутся по теме «Теоретическое обоснование затрат мощности на измельчение стебельчатых кормов измельчителем с шарнирно подвешенными комбинированными ножами» [11].

Материалы и методы

Схема разработанного измельчителя представлена на рисунке 1 [9].

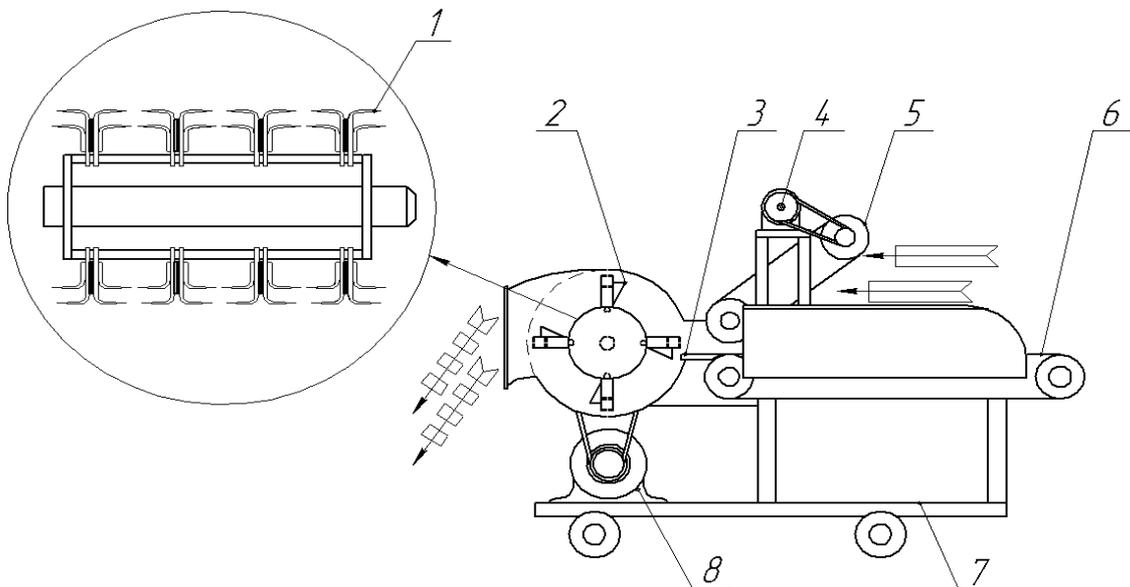


Рис. 1. Схема разработанного измельчителя кормов: 1 – поперечные лезвия серповидной формы; 2 – вертикальные лезвия (клиновидные); 3 – противорезущая пластина; 4 – механизм питателя; 5 – прижимной транспортер; 6 – подающий транспортер; 7 – рама агрегата; 8 – привод;

← ————— — неизмельченные стебли; ← □□□□ — измельченные стебли

Конструкция обеспечивает одновременное продольное дробление стеблей, включая армирующие прожилки, и их поперечное резание. При этом совмещается способ резания пуансоном, представляющий собой рубку, и резание скольжением.

Кратко остановимся на анализе механизма с точки зрения системного анализа. Он представляет собой стохастическую систему, состоящую из ряда подсистем с весьма специфическими свойствами, подчиняющимися закономерностям противоречивого характера, что весьма затрудняет процесс моделирования.

К основным взаимосвязям работы системы, в первую очередь, относятся:

- влияние случайного и плохо поддающегося оценке сочетания свойств стебля, к которым относятся: влажность, степень предварительного уплотнения, структура и осо-

бенности строения различных стеблей и т. п., параметры с геометрией рабочего органа в статике (конфигурация ножей и т. п.) и динамике (углы резки и скольжения);

- энергетическая эффективность, то есть функция от динамических характеристик рабочего органа, пространственного положения стебля, числа оборотов, распределения нагрузки со стороны подаваемого материала и подачи;

- взаимодействие рабочего органа и стебля на локальном уровне, которое определяет способность одновременно всеми ножами отсекал (отрезать) определенную часть от суммарного поперечного сечения стебля и, как следствие, повышать производительность агрегата;

- оптимальное взаимодействие режущего рабочего органа и прижимного транспортера, которое не может адаптивно изменяться в процессе работы по причине нестабильности свойств подаваемого на измельчение грубого или сочного стебельчатого материала.

Приведенные данные позволяют сформулировать основные принципы синтеза создания механизма измельчителя, с одной стороны, и построения математической модели его работы – с другой.

Во-первых, определять базовые параметры функционирования системы в процессе работы за счет придания механизму способности к адаптации, путем создания обратной связи не представляется возможным, поэтому их оптимальные значения должны быть рассчитаны заранее. Необходимо детальное математическое моделирование работы устройства.

Во-вторых, моделирование системы целесообразно проводить в два этапа: на первом следует определить взаимосвязи факторов с результирующими параметрами методом черного ящика, а на втором этапе – разработать аналитические модели, описывающие связи между наиболее существенными показателями работы и факторами.

Результаты и их обсуждение

Первый этап анализа представлен на схеме (рис. 2). Установлено, что основными параметрами, определяющими эффективность работы измельчителя, являются удельная энергоёмкость \mathcal{E}_y , производительность W и степень измельчения λ .

В качестве наиболее существенных факторов рассмотрены следующие:

- зазор между вальцами питающих транспортеров;
- подача материала в камеру измельчения;
- влажность материала;
- угол наклона прижимного транспортера;
- мощность на приводе питателя;
- толщина перерезаемого слоя;
- частота вращения барабана;
- зазор между ножами и противорезом;
- количество вертикальных лезвий;
- количество поперечных лезвий;
- мощность на приводе барабана;
- размеры выгрузного окна;
- подача измельченного материала;
- размер ячейки решета;
- зазор между серповидными лезвиями.

Исходя из степени влияния отдельных факторов целью аналитического моделирования была выбрана связь между производительностью и геометрическими параметрами взаимодействия ножей и стебля для различных расчетных схем резания. Данные схемы, по нашему мнению, исчерпывают все возможные варианты, связанные как с физико-геометрическими свойствами стеблей, так и с различными вариантами их взаимодействия с рабочим органом.

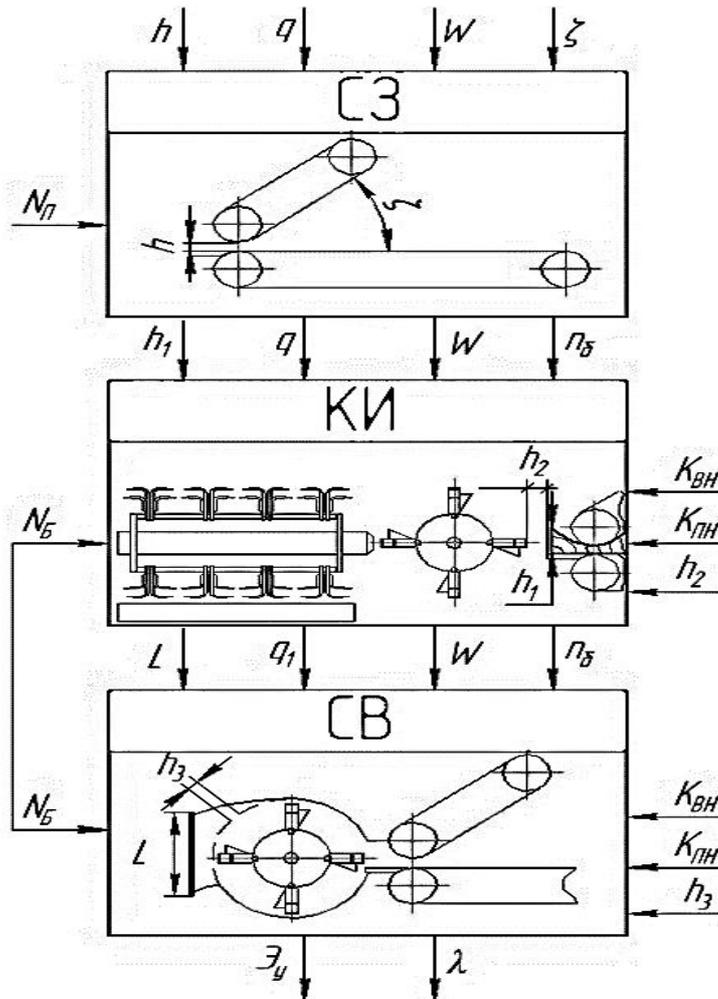


Рис. 2. Метод черного ящика: СЗ – система загрузки; КИ – камера измельчения; СВ – система выгрузки; h – зазор между вальцами питающих транспортеров; q – подача материала в камеру измельчения; W – влажность материала; ζ – угол наклона прижимного транспортера; N_{Π} – мощность на привод питателя; h_1 – толщина перерезаемого слоя; n_{δ} – частота вращения барабана; h_2 – зазор между ножами и противорезом; $K_{ВН}$ – количество вертикальных лезвий; $K_{ПН}$ – количество поперечных лезвий; N_{δ} – мощность на привод барабана; L – размеры выгрузного окна; q_1 – подача измельченного материала; h_3 – размер ячейки решета; h_4 – зазор между серповидными лезвиями; \mathcal{E}_y – удельная энергоемкость процесса измельчения; λ – степень измельчения

Функция взаимосвязи параметров и факторов принимает вид

$$\begin{cases} W_u = \Phi_1 \left(\frac{N_{\Pi}, N_{\delta}, h, h_1, n_{\delta}}{q, q_1, \theta, W, L, h_3, K_{ВН}, K_{ПН}} \right); \\ \mathcal{E}_y = \Phi_2(h, q, W, \theta, h_1, n_{\delta}, h_2, K_{ВН}, K_{ПН}, L, h_3); \\ \lambda = \Phi_3(h, q, W, \theta, h_1, n_{\delta}, h_2, K_{ВН}, K_{ПН}, L, h_3). \end{cases} \quad (1)$$

В процессе работы комбинированные ножи могут совершать следующие действия:

- расщеплять стебли вертикальными клиновидными лезвиями (рис. 3, а);
- резать стебли серповидными лезвиями (рис. 3, б);
- осуществлять одновременное воздействие двух видов лезвий (рис. 3, в).

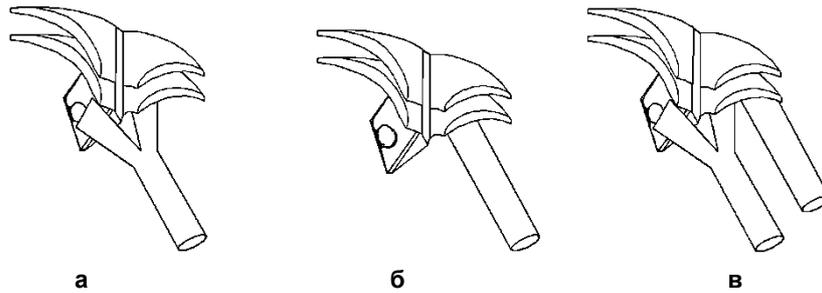


Рис. 3. Виды взаимодействия комбинированного ножа со стеблем

Производительность агрегата рассматривалась как способность рабочего органа отсекасть за единицу времени (одновременно всеми режущими кромками) некоторую часть суммарного сечения массива кормов, подаваемого на измельчение [3, 7, 9].

$$W_u = \frac{n_n S_c}{t}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (2)$$

где S_c – площадь поперечного сечения стебля, отсекаемая серповидным лезвием;
 n_n – количество лезвий на ноже.

При этом, как было установлено при факторном анализе на первом этапе исследований, имеется весьма четкая корреляция между энергоемкостью процесса и объемом отсекаемой части стебля. Сечение стебля под нагрузкой деформируется в виде эллипса, в то время как криволинейное лезвие ножа представляет собой спираль Архимеда.

Площадь отсекаемого ножом сечения стебля может быть рассчитана на основании интегрирования (рис. 4), пределы которого (координаты точек A и B) получим из системы уравнений сечения деформированного стебля: $\pm f(x)$ и траектории режущей кромки: $\rho = \rho(\varphi)$.

$$\rho = \phi(\varphi); \quad \varphi(a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi) = a^2 b^2. \quad (3)$$

$$\text{Получим} \quad \begin{cases} \rho = \frac{ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}} \\ \rho = \varphi \end{cases}. \quad (4)$$

Интегрировать зависимость $f(x)$ имеет смысл в декартовых, а функцию $\rho(\varphi)$ лучше представить в полярных координатах.

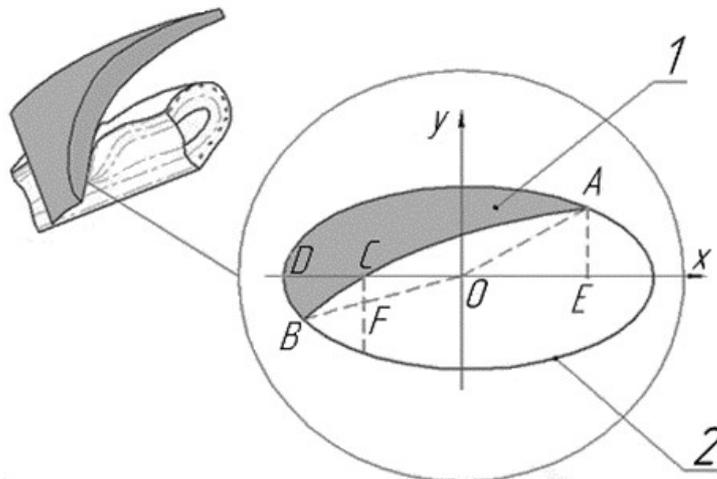


Рис. 4. Резание поперечного сечения стебля: 1 – поперечное сечение стебля, подлежащее рассечению ножом; 2 – сечение стебля после начала резания в сжатом виде

Высота образованного криволинейного цилиндра равна длине отрезаемой части

$$l = l_0 + x \operatorname{tg} \varphi, \quad (5)$$

где φ – угол скольжения – угол, под которым колос поступает на резание (среднее значение этого параметра по нормальному закону составляет 45°).

Пределы интегрирования, которыми являются абсциссы A и B , получим из системы $\pm f(x)$. Соответственно, уравнения $f(x)$ в декартовых координатах и $\rho = \rho(\varphi)$ в полярных координатах примут следующий вид [10, 12]:

$$\rho = \phi(\varphi): \phi(a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi) = a^2 b^2. \quad (6)$$

Поскольку уравнение не может быть решено алгебраически, запишем его в общем виде для численного решения:

$$A(\varphi_A, \rho_A) \text{ или } A(x_A, y_A); B(\varphi_B, \rho_B) \text{ или } B(x_B, y_B); C(-\varphi_0 - k\pi; 0); D(-a, 0). \\ S_c = \frac{b}{2a} \left(x_A \sqrt{a^2 - x_A^2} + x_C \sqrt{a^2 - x_C^2} \right) + \frac{ab}{2} \left(\arcsin \frac{x_A}{a} + \arcsin \frac{x_C}{a} \right) - \\ - \frac{3ab\pi + x_A y_A (\varphi_0 + k\pi)^2 \operatorname{tg} \varphi}{2}. \quad (7)$$

$$W_u = \frac{n_u S_c b}{2at} \left(x_A \sqrt{a^2 - x_A^2} + x_C \sqrt{a^2 - x_C^2} \right) + \frac{ab}{2} \left(\arcsin \frac{x_A}{a} + \arcsin \frac{x_C}{a} \right) - \\ - \frac{3ab\pi + x_A y_A (\varphi_0 + k\pi)^2 \operatorname{tg} \varphi}{2}. \quad (8)$$

Исходя из предложенной расчетной схемы можно заметить, что практически значение угла скольжения φ ($0 \leq \varphi \leq \pm 180^\circ$) является параметром, разграничивающим параллельно протекающие процессы разрушения материала стеблей: при $\varphi \geq 45^\circ$ доминирует расщепление материала, а при $\varphi \leq 45^\circ$ – поперечное расщепление, то есть предпочтительны большие значения угла скольжения [5, 9].

Перейдем к рассмотрению энергоемкости. Возможны два варианта взаимного расположения режущего агрегата и стебля.

Вариант 1. Если ось стебля близка к оси поверхности резания, то, учитывая, что $D \gg d$, эллиптичность полученной поверхности среза пренебрежимо мала, при этом срез представляет собой плоскую фигуру. Схема измельчения представлена на рисунке 5.

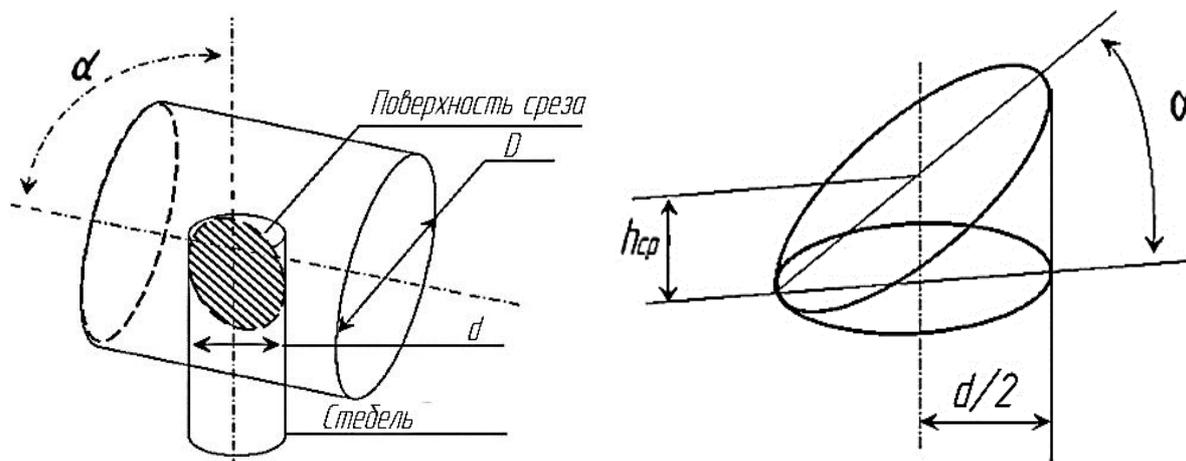


Рис. 5. Схема измельчения

В данном случае задача сводится к поиску усеченного плоскостью цилиндра [10, 12]:

$$V = S_{осн} h_{ср}, \text{ м}^3, \quad (9)$$

где $h_{ср}$ – средняя высота цилиндра.

При этом

$$h_{ср} = \frac{d \sin \alpha}{2}, \quad (10)$$

$$S_{осн} = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (11)$$

Объем части стебля, которая удаляется ножом, может быть определен из формулы

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \frac{d \sin \alpha}{2} = \frac{\pi d^3}{8} \sin \alpha. \quad (12)$$

Вариант 2. Если имеет место взаимное расположение поверхности, образуемой режущим инструментом, и поверхности стебля, то в этом варианте их оси будут разнесены на некоторое существенное расстояние δ . При этом нельзя игнорировать тот факт, что часть среза стебля имеет форму цилиндра (рис. 6).

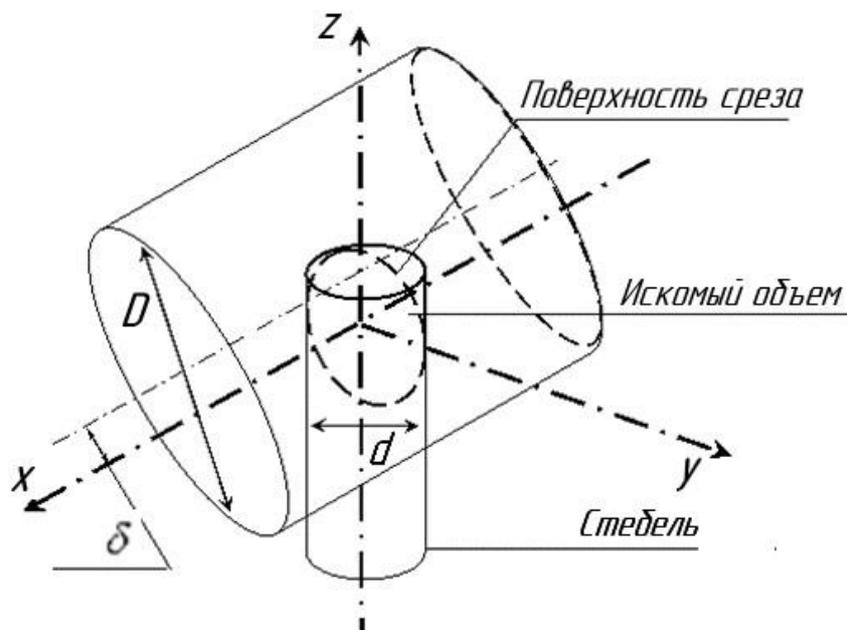


Рис. 6. Схема определения формы поверхности среза

В результате интегрирования получим формулу

$$V = \lambda \left(\frac{1-\pi}{16} d^4 + \frac{d^3 \delta (4-2\sqrt{2})}{3} + 2\delta^2 d \pi \right). \quad (13)$$

В этом случае при резке или рубке стебля имеет место продольный скол отсекаемой его части. Тогда зона резания приобретает характерный вид, изображенный на рисунке 7 [5].

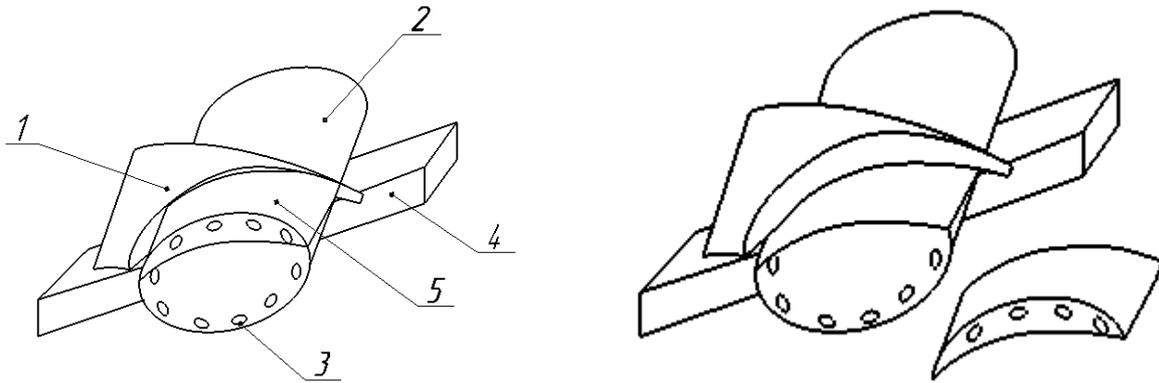


Рис. 7. Схема продольного скола зоны резания: 1 – режущая кромка; 2 – рассекаемый стебель; 3 – расположение армирующих прожилок; 4 – расположение противореза; 5 – удаленная часть стебля

Объем удаленной части стебля после преобразования определяется из формулы

$$V_c = \frac{bl_0}{a}(X_A + X_B 2a) - \frac{2(2a^2 - X_B^2 - X_A^2)}{3 \cdot \operatorname{tg} \alpha} - (l_0(X_A - X_B) \operatorname{tg} \alpha \varphi_o (\varphi_B - \varphi_A) + 4\varphi_o k(X_A - X_B) \cdot \operatorname{tg} \alpha \varphi_o k(\varphi_B^2 - \varphi_A^2) + k^2(X_A - X_B) \cdot \operatorname{tg} \alpha k^2(\varphi_B^3 - \varphi_A^3)). \quad (14)$$

Энергоемкость процесса примет следующий вид:

$$\mathcal{E}_y = K_y^{y\partial} K_y^{el} K_y^{y\partial} \frac{bl_0}{a}(X_A + X_B 2a) - \frac{2(2a^2 - X_B^2 - X_A^2)}{3 \cdot \operatorname{tg} \alpha} - (l_0(X_A - X_B) \operatorname{tg} \alpha \varphi_o (\varphi_B - \varphi_A) + 4\varphi_o k(X_A - X_B) \cdot \operatorname{tg} \alpha \varphi_o k(\varphi_B^2 - \varphi_A^2) + k^2(X_A - X_B) \cdot \operatorname{tg} \alpha k^2(\varphi_B^3 - \varphi_A^3)), \quad (15)$$

где $K_y^{y\partial} K_y^{el} K_y^{y\partial}$ – коэффициенты энергоемкости, зависящие от вещества стебля, (удельной) влажности и угла установки ножей.

Из (15) следует, что с увеличением угла резки α энергоемкость растет, при этом из схем (см. рис. 5, 6) видно, что этот угол определяет взаимное расположение стебля и режущего инструмента. При малых его значениях доминирует поперечная рубка, при больших – резка. То есть рубка оказывается энергетически более выгодной, а угол резки следует выдерживать меньшим 35–45°. При этом повышенная влажность стебля приводит к его залипанию на ноже, увеличивает его окружную скорость и, как следствие, рост угла резки. Отсюда следует, что для снижения затрат необходимым условием является минимальная влажность стеблей.

Выводы

В результате проведенного исследования работы измельчителя кормов, выполненного по схеме со свободно подвешенными комбинированными ножами, были предложены:

1) стохастическая и аналитическая модели, анализ которых позволил установить:
 - основными параметрами, определяющими эффективность работы механизма, являются степень измельчения и удельная энергоемкость;
 - наиболее значимыми факторами, определяющими значения указанных параметров, являются подача измельчаемого материала, размер ячейки решета, зазор между серповидными лезвиями, удельная энергоемкость процесса измельчения.

2) аналитическая модель, связывающая производительность работы измельчителя с геометрическими параметрами в зоне резки, из которой следует, что:

- производительность повышается при резке стеблей с большей площадью поперечного сечения;

- большую производительность рассматриваемого комбинированного лезвия обеспечивают малые углы скольжения, т. е. поперечная резка без расщепления;
- большую энергетическую эффективность процесса обеспечивают режимы работы, при которых рубка стебля доминирует над его резкой.

Следовательно, в измельчитель целесообразно подавать предварительно уплотненный пакет просушенных стеблей, уложенных вдоль транспортера.

Библиографический список

1. Беляничков Н.Н. Механизация животноводства и кормопроизводства : учебник / Н.Н. Беляничков, А.И. Смирнов. – Москва : Агропромиздат, 1990. – 271 с.
2. Братишко В.В. Обоснование процесса работы и параметров двухступенчатого измельчителя зеленых кормов для свиней и водоплавающей птицы : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11 / В.В. Братишко. – Глеваха, 2007. – 184 с.
3. Василенко М.П. Механизация и автоматизация процесса приготовления и дозирования кормов / М.П. Василенко, И.И. Василенко. – Москва : Агропромиздат, 1985. – 140 с.
4. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике / М.Я. Выгодский. – Москва : АСТ: Астрель, 2010. – 703 с.
5. Гулевский В.А. Краткий курс теоретической механики : учеб. пособие / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий. – Воронеж : ФГОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2009. – 178 с.
6. Завражнов А.И. Механизация приготовления и хранения кормов : учеб. пособие для вузов по спец. «Механизация сельского хоз-ва» / А.И. Завражнов, Д.И. Николаев. – Москва : Агропромиздат, 1990. – 336 с.
7. Карпов В.В. Анализ сил взаимодействия рабочих органов гофрощеточных барабанов очистителя кормовых корнеплодов с объектами очистки / В.В. Карпов, В.А. Гулевский // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2017. – № 2 (53). – С. 121–127.
8. Пат. 69756 Україна, МПК В02С 18/00. Подрібнювач грубих та стеблових кормів / Брагінець М.В., Бахарев Д.М., Вертій О.А., заявник та власник Луганський національний аграрний університет. №u201113038; заявл. 07.11.2011; опубл.10.05.2012, Бюл. № 9. – 4 с.
10. Ревенко И.И. Совершенствование и обоснование параметров измельчителя и смесителя кормов / И.И. Ревенко, В.С. Хмелевский // Механизация сельскохозяйственного производства : сб. научных трудов. – Киев : НАУ, 1999. – Т. 4. – С. 139–142.
11. Сабликов Н.В. Исследование процесса резания стеблей ножами соломосилосорезок : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.В. Сабликов. – Ташкент, 1958. – 14 с.
12. Теоретическое обоснование затрат мощности на измельчение стебельчатых кормов измельчителем с шарнирно подвешенными комбинированными ножами / С.Ф. Вольвак, Д.Н. Бахарев, А.А. Вертий, Е.Е. Корчагина // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2017. – № 1 (13). – С. 23–32.
13. Шипачев В.С. Высшая математика : учебник / В.С. Шипачев. – Москва : ИНФРА-М, 2009. – 479 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Вячеслав Анатольевич Гулевский – доктор технических наук, профессор кафедры математики и физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 253-18-68, e-mail: main@srd.vsau.ru.

Александр Анатольевич Вертий – заместитель директора по учебной работе ГБОУ СПО ЛНР «Краснолучский горно-промышленный колледж», ЛНР, г. Красный Луч, тел. +38(066)485-40-76, e-mail: aleksander-vertij@ya.ru.

Дата поступления в редакцию 20.07.2018

Дата принятия к печати 12.08.2018

AUTHORCREDENTIALS Affiliations

Vyacheslav A. Gulevsky – Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Mathematics and Physics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, tel. 8(473) 253-18-68, e-mail: main@srd.vsau.ru.

Alexander A. Vertij – Deputy Director for Studies, Krasnyi Luch Mining and Industrial College, Luhansk Peoples' Republic, Krasnyi Luch, tel. +38(066)485-40-76, e-mail: aleksander-vertij@ya.ru.

Received July 20, 2018

Accepted August 12, 2018