УДК 631.363:636.086.5

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НОЖЕЙ ПРИ РЕЗАНИИ ПЛОСКОГО СЛОЯ ПРОДУКТА

С.В. Вендин, доктор технических наук
В.А. Самсонов, доктор технических наук
Ю.В. Саенко, доктор технических наук
М.А. Семернина, аспирант
ФГБОУ ВО Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина
E-mail: yuriy311300@mail.ru

Аннотация. *По данным зоотехников, одним из простых, доступных и недорогих способов повышения витаминной полноценности рационов животных является добавление пророщенного зерна ячменя в корм. Рассмотрена технология получения кормовой смеси на основе пророщенного зерна. Приготовление кормовой смеси из комбикорма с добавлением пророщенного зерна предполагает измельчение последнего до размеров частиц 0,9-1,4 мм с последующим перемешиванием полученной массы. Зерно имеет форму эллипсоида и большую массу, а росток имеет меньшую массу, вытянутую по длине и сплющенную в поперечном сечении форму. Геометрические размеры, плотность и физико-механические свойства самого зерна и ростков неодинаковы, поэтому традиционные способы измельчения зерна не совсем применимы – измельчение пророщенного зерна молотковыми дробилками не позволяет получить нужный результат, т.е. ростки практически не измельчаются. Для эффективного измельчения пророщенного высушенного зерна предлагается конструкция дробилки, в которой дробление зерна осуществляется в дробильной камере молотками, а для резания ростков используется аппарат вторичного измельчения. Предложена методика выбора конструктивных параметров ножей при резании плоского слоя продукта. В основу расчетных соотношений положена теория В.П. Горячкина о затратах энергии на резание. Получены соотношения, связывающие угол заточки ножа с толщиной лезвия ножа и с начальной высотой слоя. Толщина лезвия ножа и толщина слоя сжатия продукта увязаны с прочностными свойствами материала, что позволяет оптимизировать параметры и размеры рабочих органов измельчающего аппарата.*
Ключевые слова: *резание, плоский слой продукта, режущая кромка ножа, угол заточки ножа.*

Введение. При реализации различных технологических процессов в промышленности и в сельском хозяйстве, например, при предварительной обработке и подготовке компонентов к смешиванию, необходимо проводить измельчение продуктов [1, 2]. Измельчаемые материалы могут быть органического и неорганического происхождения и существенно различаться по своим физико-механическим и прочностным свойствам. Продукты растительного происхождения характеризуются разбросом физико-механических свойств, которые зависят, в основном, от влажности материала, а также формы поперечного сечения разрушаемого объекта [3-8]. Поэтому для обеспечения эффективности технологического процесса и снижения энергозатрат необходимо увязывать конструктивные параметры измельчителя со структурными и физико-механическими свойствами продукта. Однако в первом приближении непосредственно процесс резания можно идеализировать как процесс резания плоского слоя продукта ножом, направление резания которого перпендикулярно плоскости продукта. Ниже приведены результаты теоретических исследований процесса резания на основе теории В.П. Горячкина о затратах энергии на резание [9, 10].

Основная часть. Физическая модель процесса резания плоского слоя продукта лезвием ножа (расчетная схема) представлена на рисунке 1. Предполагается подпорное резание слоя материала. Для математической постановки задачи сделаем некоторые допущения и упрощения:

- резание осуществляется перпендикулярно плоскости слоя продукта;
- ширина лезвия ножа больше толщины слоя продукта;

- физико-механические и прочностные свойства материала одинаковы по всему сечению разрезаемого слоя продукта;

- режущая кромка ножа имеет угол заточки γ относительно линии резания слоя продукта.

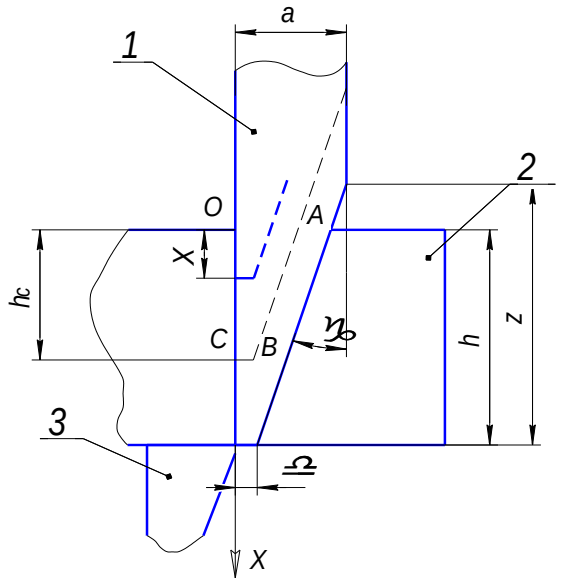

Рис. 1. Схема резания: *a* - толщина ножа; *h* - высота слоя разрезаемого материала; *z* - длина участка заточки ножа; γ - угол заточки; 1 - нож; 2 - материал; 3 - противорежущая пластина; δ - толщина режущей кромки; h_c- высота сжимаемого слоя; *x* - текущее перемещение ножа

Цель исследований заключается в оценке влияния конструктивных параметров лезвия ножа (δ, γ, *z*) и свойств материала на энергетику процесса резания.

Согласно теории В.П. Горячкина, полная энергия измельчения (*A*, Дж) является суммой энергии сжатия продукта лезвием ножа (A_c, Дж) и энергии резания (A_p, Дж) [9, 10]:

$$A = A_c + A_p, \quad (1)$$

где *A* – полная энергия, затрачиваемая на резание, Дж; A_c – энергия сжатия продукта лезвием ножа, Дж; A_p – энергия резания, Дж.

Исходя из физической модели, определим основные стадии процесса:

- при перемещении ножа на расстояние от $x = 0$ до $x = h_c$, м, происходит сжатие материала силой $N_c(x)$, Н;

- при перемещении ножа от точки С сила $N_c(x)$, Н, уравновешивается силой резания $N_p(x)$, Н, материала на участке ($h - h_c$), т.е. в точке $x = h_c$ соблюдается условие равновесия системы:

$$N_c(x) = N_p(x)\ . \quad (2)$$

Сила сжатия определяется с учетом допустимого напряжения сжатия материала:

$$N_c(x) = \sigma L(\delta + x\mathrm{tg}\gamma), \quad (3)$$

где σ – допустимое напряжение сжатия, Па; *L* – ширина слоя, м; δ – толщина режущей кромки, м.

Сила резания определяется с учетом допустимого напряжения среза материала:

$$N_p(x) = \tau L x, \quad (4)$$

где τ – допустимое напряжение среза, Па.

Из равенства (2) с учетом выражений (3) и (4) при $x = h_c$ найдем:

$$h_c = (kh - \delta)/(1 + \mathrm{tg}\gamma), \quad (5)$$

где $k = \tau/\sigma$.

Для энергетической оценки измельчения определим работу сил. Элементарная работа силы сжатия:

$$\mathrm{d}A_c = N_c(x)\mathrm{d}x = \sigma L(\delta + x\mathrm{tg}\gamma)\mathrm{d}x, \quad (6)$$

откуда

$$A_c = \sigma L\int_0^{h_c}(\delta + x\mathrm{tg}\gamma)dx = \sigma L\left(\delta h_c + 0{,}5h_c^2\mathrm{tg}\gamma\right). \quad (7)$$

Элементарная работа силы резания:

$$\mathrm{d}A_p = N_p(x)\mathrm{d}x, \quad (8)$$

откуда

$$A_p = \tau L\int_0^{h-h_c} x dx = 0{,}5\tau L(h - h_c)^2. \quad (9)$$

С учетом (1) в качестве первого критерия оптимальности принимаем минимум суммарной относительной работы, мм^2:

$$A_0 = \frac{A_C}{\sigma L} + \frac{A_P}{\sigma L} = \delta h_C + 0{,}5h_C^2 tg\gamma +$$

$$+ 0{,}5k(h - h_C)^2 \to \min \quad (10)$$

При внедрении нож сжимает материал объемом

$$V = SL, \quad (11)$$

$$S = \delta h_C + 0{,}5h_C^2 tg\gamma, \quad (12)$$

где S – площадь трапеции OABC.

В качестве второго критерия оптимальности используем минимум удельных энергозатрат на сжатие (безразмерная величина):

$$A_{OY} = \frac{A_0}{S} \to \min. \quad (13)$$

Показатели δ, γ и *z* связаны выражением:

$$z = \frac{(a-\delta)}{tg\gamma} \geq h\,. \qquad (14)$$

Рассмотрим пример расчета δ, γ и *z* с использованием следующих исходных данных $0{,}01 \leq \delta \leq 0{,}1$; *h*=4 мм; *a*=2 мм; σ =30 МПа; τ = 0,8 МПа. Минимизируем (10) методом дихотомии [11] по переменной *z* в интервале (*h* ... *qh*) для каждого изменяемого в цикле с шагом Δδ = 0,01 мм значения δ, где принято *q* = 5 (произвольное число). Алгоритм расчета: *tg*γ = (a-δ)/*z* – из формулы (14); h_c; *S*; A_0; $A_{0У}$ с учетом (5), (10), (11), (12). Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета

δ, мм	γ, град	*Z*, мм	A_0, мм^2	$A_{0У}$
h=4 мм; *k*=0,8/30=0,0266				
0,01	8,86	12,77	0,2058	149,05
0,02	8,98	12,53	0,2073	106,92
0,03	11,1	10,04	0,2088	89,81
0,04	13,5	8,16	0,2101	84,14 min
0,05	18,45	5,85	0,2112	87,08
0,06	12,10	9,05	0,2117	85,92
0,07	22,47	4,66	0,2125	108,71
0,08	19,20	5,51	0,2128	128,97
0,09	25,40	4,02	0,2131	203,50
0,1	25,42	4,00	0,2133	466,92

Из таблицы следует, что с увеличением δ возрастают энергозатраты A_0, но при этом критерий (13) достигаем минимума, определяющего оптимальные параметры режущей части ножа при *h*=4 мм: δ= 0,04 мм; γ=13^{0}30$^/$; *z* = 8,16 мм.

Разработанная математическая модель и алгоритм расчета дают возможность определить оптимальные параметры ножа в различных вариантах резки (таблица 2). Из таблицы 2 можно сделать выводы (при $0{,}01 \leq \delta \leq 0{,}1$ мм) о достижении минимума $A_{0У}$ при ограничении (13):

- при увеличении высоты разрезаемого слоя *h* минимум удельных энергозатрат $A_{0У}$ достигается увеличением толщины ножа «*a*» (варианты 1, 2 и 3);

- по сравнению с вариантами при δ=0,04 мм (таблица 1) с увеличением предела прочности на сжатие (вариант 4) минимум удельных энергозатрат $A_{0У}$ достигается при уменьшении толщины режущей кромки δ и уменьшении угла заточки γ; с увеличением предела прочности на срез (вариант 5) минимум энергозатрат $A_{0У}$ достигается при увеличении δ и уменьшении γ.

Таблица 2. Оптимальные параметры ножа в различных вариантах резки

№	*h*, мм	*a*, мм	*k*=τ/ σ	δ, мм	γ, град	*z*, мм	A_0, мм^2	$A_{0У}$
1	8	2	0,8/30=0,0266	0,10	6,03	18,00	0,84	77,96
2	50	6	0,8/30=0,0266	0,09	6,35	53,12	32,03	188,04
3	100	15	0,8/30=0,0266	0,09	8,42	100,78	127,98	222,7
4	4	2	0,8/35=0,0288	0,09	11,10	10,04	0,18	100,03
5	4	2	1/30=0,0333	0,05	9,02	12,28	0,26	65,18
6	20	6	1/30=0,0333	0,08	11,36	28,84	5,18	116,1

На рисунке 2 представлена зависимость толщины ножа от высоты слоя разрезаемого материала.

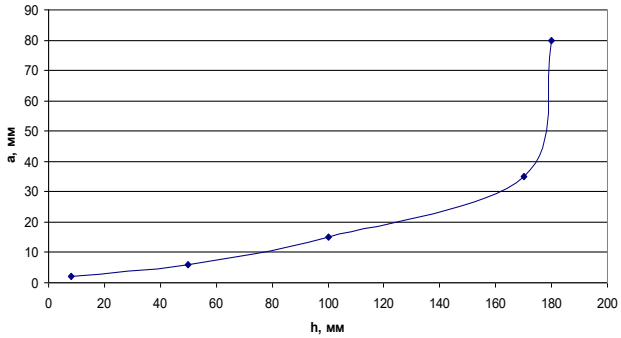

Рис. 2. Зависимость толщины ножа от высоты слоя разрезаемого материала

Выводы.

1. Предложена методика расчета геометрических параметров ножа по минимуму затрат на резание плоского слоя продукта.

2. Проведенные расчеты для материала с параметрами σ=30 МПа; τ = 0,8 МПа показали, что максимальную толщину разрезаемого слоя следует принять *h* = 170 мм, т.к. при *h* > 170 мм резко возрастает толщина ножа «*a*»: при *h* = 8-170 мм ее прирост составляет 0,2 мм, а при *h* = 170-180мм – 4,5 мм.

3. Для резания продукта (σ=30 МПа; τ = 0,8 МПа) с толщиной слоя 20 мм конструктивные параметры должны быть следующи-

ми: толщина ножа a=6 мм, толщина режущей кромки ножа δ = 0,08 мм; угол заточки γ= 11,36º; длина участка заточки ножа z = 28,84 мм.

Литература:

1. Пат. 2012102292 RU. Технологическая линия для подготовки к скармливанию пророщенного зерна / Булавин С.А. и др. Заяв. 23.01.12; Опубл. 27.09.13
2. Вендин С.В. Измельчение пророщенного зерна для приготовления кормовых смесей. М., 2017. 137 с.
3. Вольвак С.Ф. Теоретическое обоснование затрат мощности на измельчение стебельчатых кормов измельчителем с шарнирно подвешенными комбинированными ножами // Инновации в АПК. 2017. № 1(13).
4. Теоретическое обоснование затрат мощности измельчителем стебельчатых кормов с шарнирно подвешенными комбинированными ножами // Проблемы и решения современной аграрной экономики. Белгород, 2017. С. 32.
5. Бахарев Д.Н. Бионические основы разработки и конструирования эффективных шипов молотильно-сепарирующих устройств для кукурузы // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2017. № 3. С. 3-13.
6. К расчёту конструктивных параметров ножей для измельчения пророщенного зерна / С.В. Вендин и др. // Инновации в АПК. 2018. № 1. С. 16-31.
7. Пат. 2012111904 RU. Дробилка пророщенного высушенного зерна / С.А. Булавин и др. Опубл. 27.09.13
8. Обоснование частоты вращения ножей дробилки пророщенного зерна / С.В. Вендин и др. // Механизация и электрификация с. х. 2015. № 4. С. 9-12.
9. Процессы и аппараты пищевой технологии. М., 2000.
10. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. Л., 1978. 560 с.
11. Волков Е.А. Численные методы. М., 1987. 248 с.

Literatura:

1. Pat. 2012102292 RU. Tekhnologicheskaya liniya dlya podgotovki k skarmlivaniyu proroshchennogo zerna / Bulavin S.A. i dr. Zayav. 23.01.12; Opubl. 27.09.13
2. Vendin S.V. Izmel'chenie proroshchennogo zerna dlya prigotovleniya kormovyh smesej. M., 2017. 137 s.
3. Vol'vak S.F. Teoreticheskoe obosnovanie zatrat moshchnosti na izmel'chenie stebel'chatyh kormov izmel'chitelem s sharnirno podveshennymi kombinirovannymi nozhami // Innovacii v APK. 2017. № 1(13).
4. Teoreticheskoe obosnovanie zatrat moshchnosti izmel'chitelem stebel'chatyh kormov s sharnirno podveshennymi kombinirovannymi nozhami // Problemy i resheniya sovremennoj agrarnoj ekonomiki. Belgorod, 2017. S. 32.
5. Baharev D.N. Bionicheskie osnovy razrabotki i konstruirovaniya effektivnyh shipov molotil'no-separiruyushchih ustrojstv dlya kukuruzy // Innovacii v APK: problemy i perspektivy. 2017. № 3. S. 3-13.
6. K raschyotu konstruktivnyh parametrov nozhej dlya izmel'cheniya proroshchennogo zerna / S.V. Vendin i dr. // Innovacii v APK. 2018. № 1. S. 16-31.
7. Pat. 2012111904 RU. Drobilka proroshchennogo vysushennogo zerna / S.A. Bulavin i dr. Opubl. 27.09.13
8. Obosnovanie chastoty vrashcheniya nozhej drobilki proroshchennogo zerna / S.V. Vendin i dr. // Mekhanizaciya i elektrifikaciya s. h. 2015. № 4. S. 9-12.
9. Processy i apparaty pishchevoj tekhnologii. M., 2000.
10. Mel'nikov S.V. Mekhanizaciya i avtomatizaciya zhivotnovodcheskih ferm. L., 1978. 560 s.
11. Volkov E.A. CHislennye metody. M., 1987. 248 s.

JUSTIFICATION OF KNIVES' DESIGN PARAMETERS AT PRODUCT'S FLAT LAYER CUTTING

S.V. Vendin, doctor of technical sciences
V.A. Samsonov, doctor of technical sciences
Y.V. Saenko, doctor of technical sciences
M.A. Semernina, post-graduate student
FGBOY VO Belgorod state agrarian university after V.Ya. Gorin

Abstract. *According to zootechnical date, one of the simple, affordable and inexpensive ways of the animals' rations with vitamin value increasing is the sprouted barley grain in the feed adding. The feed mixture obtaining technology based on sprouted grain is considered. The feed mixture preparation with the sprouted grain addition involves its till 0,9-1,4 mm size of particles' grinding, and result mass's following mixing. The grain has an ellipsoid shape and a large mass, and the sprout has a smaller mass, elongated in length and flattened in cross-section shape. The grain and sprouts' geometric dimensions, density and physical-and-mechanical properties are not the same, so the grain grinding's traditional methods are not quite applicable–sprouted grain grinding with hammer crushers does not allow to obtain the desired result, because the sprouts practically aren't crushed. For sprouted dried grain's effective grinding, a crusher's design is proposed, when the grain crushing in the crushing chamber with hammers is carried out, and for sprouts' cutting , a secondary grinding's apparatus is used. A knives design parameters selecting methodology at a product flat layer cutting is proposed. The calculated ratios' basis is V.P. Goryachkin's theory about energy cutting's cost. The relations connecting a knife's sharpening angle with a knife's blade thickness and layer's initial height are received. The knife's blade thickness and the product's compression layer thickness with the material's strength properties are related, that allows the grinding apparatus' working bodies parameters and dimensions to optimize.*

Keywords: *cutting, product's flat layer, knife's cutting edge, knife's sharpening angle.*