

УДК 631.363.2:636.085

**А. В. Китун**<sup>1</sup>, доктор технических наук, профессор,  
**В. И. Передня**<sup>2</sup>, доктор технических наук, профессор,  
**П. Ю. Крупенин**<sup>3</sup>, кандидат технических наук, доцент,  
**В. Г. Филатов**<sup>4</sup>, **И. В. Дубень**<sup>5</sup>, кандидат технических наук, доцент

<sup>1</sup> Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, ktmg@batu.edu.by

<sup>2</sup> Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства», ул. Кнорина, 1, 220049 Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup> Учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», ул. Мичурина, 5, 213407 Горки, Республика Беларусь, pavel@krupenin.com

<sup>4</sup> Открытое акционерное общество «Управляющая компания холдинга «Бобруйскагромаш», ул. Шинная, 5, 213822 Бобруйск, Республика Беларусь, delo@agromash.by

<sup>5</sup> Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КОРМОВ ПЛОСКОСТНЫМ РОТОРНЫМ ИЗМЕЛЬЧАЮЩИМ АППАРАТОМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА

В статье изложены результаты теоретических исследований процесса измельчения кормов в вертикальном потоке. Разработана математическая модель траектории движения частицы корма в рабочей камере плоскостного роторного измельчающего аппарата. Определены факторы, влияющие на вероятность разрушения частицы при ее встрече с ножом и противорежущим элементом, и установлена их связь с конструктивными параметрами измельчающего аппарата.

Приводятся результаты экспериментальных исследований процесса измельчения зеленой массы. Экспериментальным путем изучено влияние количества ножей плоскостного роторного измельчающего аппарата на гранулометрический состав корма. Предложена усовершенствованная конструкция измельчающего аппарата, предполагающая закрепление на одной державке двух симметричных ножей, что увеличит на 50 % вероятность встречи частиц корма с режущими элементами. Предлагаемая конструкция ротора плоскостного измельчающего аппарата позволяет повысить степень измельчения корма без изменения параметров рабочей камеры или противорежущих элементов.

**Ключевые слова:** роторный измельчающий аппарат; измельчение; математическая модель; зеленая масса; нож; противорез.

Рис. 4. Библиогр.: 6 назв.

**A. V. Kitun**<sup>1</sup>, DSc in Technical Sciences, Professor,  
**V. I. Perednya**<sup>2</sup>, DSc in Technical Sciences, Professor,  
**P. Y. Krupenin**<sup>3</sup>, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
**V. G. Filatov**<sup>4</sup>, **I. V. Duben**<sup>5</sup>, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

<sup>1</sup> Educational Institution “Belarusian State Agrarian Technical University”, 99 Nezavisimosti Prospect, 220023 Minsk, the Republic of Belarus, ktmg@batu.edu.by

<sup>2</sup> Republican Unitary Enterprise “The Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on agricultural mechanization”, 1 Knorina Str., 220049 Minsk, the Republic of Belarus

<sup>3</sup> Educational Institution “Belarusian State of the Orders of October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy”, 5 Michurina Str., 213407 Horki, the Republic of Belarus, pavel@krupenin.com

<sup>4</sup> JSC “Management Company of the “Bobruiskagromash Holding”, 5 Shinnaya Str., 213822 Bobruisk, the Republic of Belarus, delo@agromash.by

<sup>5</sup> Educational Institution “Baranovich State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranovich, the Republic of Belarus

## RESEARCH OF GRINDING FEED PROCESS BY A PLANAR VERTICAL ROTARY GRINDER

The article presents the results of theoretical studies of the process of crushing feed in a vertical stream. A mathematical model of the trajectory of the feed particle in the working chamber of a planar rotary shredder has been developed. The factors influencing the probability of destruction of a particle when it encounters a knife and an anti-cutting element are determined, and their connection with the design parameters of the shredding apparatus is established.

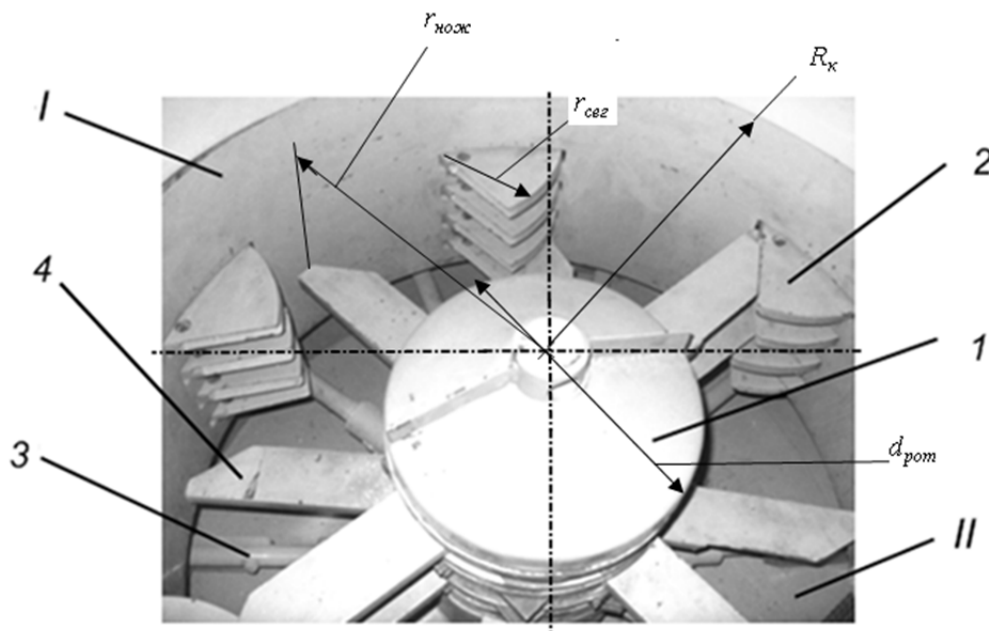
The results of experimental studies of the process of green mass grinding are presented. The effect of the number of knives of a planar rotary shredder on the granulometric composition of the feed was studied experimentally. An improved design of the shredding apparatus which involves fixing two symmetrical knives on one holder is proposed. It will increase the probability of meeting feed particles with cutting elements by 50 %. The proposed design of the rotor of a planar shredding device allows to increase the degree of feed crushing without changing the parameters of the working chamber or anti-cutting elements.

**Key words:** rotary grinder; grinding; mathematical model; green feed; knife; countercut.

Fig. 4. Ref.: 6 titles.

**Введение.** Работы по теоретическому изучению влияния отдельных параметров режущих аппаратов на степень измельчения кормов проводились многими учеными [1; 2]. Исследования были направлены на изучение влияния числа режущих пар на среднюю длину резки. Полученные результаты констатируют уменьшение средней длины резки стебельчатых кормов с увеличением числа противорежущих элементов. Однако, как отмечают сами авторы, полученные результаты теоретических исследований не в полной мере согласуются с экспериментальными данными. Это свидетельствует о том, что физические процессы, протекающие в измельчителях, изучены недостаточно и требуют поиска новых решений, в том числе и для измельчителей с вертикально установленной рабочей камерой.

**Материалы и методы исследования.** В измельчителе с вертикально расположенной рабочей камерой и многоплоскостным измельчающим аппаратом корм с момента его подачи в рабочую зону под действием силы тяжести движется в сторону выгрузного окна. В ходе этого движения корм проходит через рабочую зону вращающихся лезвий ножей 4 (рисунок 1) и неподвижно установленных противорежущих элементов 2, образующих между собой режущие пары. В результате взаимодействия режущих элементов с кормом траектория движения частиц последнего через рабочую камеру представляет собой винтовую линию.



I — камера измельчения и смешивания; II — выгрузная камера;  
1 — ротор; 2 — блок противорежущих элементов; 3 — швырялка; 4 — нож

**Рисунок 1. — Плоскостной роторный измельчающий аппарат вертикального типа**

Таким образом, в период выполнения рабочего процесса корм, попадая в рабочую зону противорезающих элементов и ножей, измельчается и смешивается в непрерывном потоке. При этом частицы корма совершают два вида движения:

– прямолинейное движение вдоль режущей кромки противорезающего элемента в момент резания;

– вне рабочей зоны ножей и противорезающих элементов корм под действием силы тяжести перемещается по винтовой линии в сторону выгрузной камеры.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Исходя из изложенных предпосылок и физического процесса работы измельчающего устройства, размер измельченных частиц корма можно определить по формуле

$$l_{\text{изм}} = l_{\text{нач}} P_{\text{изм}}, \quad (1)$$

где  $l_{\text{нач}}$  — исходный размер частиц корма, м;

$P_{\text{изм}}$  — вероятность измельчения частиц корма.

Вероятность измельчения частицы корма можно определить по зависимости [3]

$$P_{\text{изм}} = 1 - e^{-\mu_{\text{изм}} t_{\text{ч}}}, \quad (2)$$

где  $\mu_{\text{изм}}$  — параметр процесса измельчения;

$t_{\text{ч}}$  — время нахождения частицы в рабочей зоне измельчения, с.

Параметр процесса  $\mu_{\text{изм}}$ , представляющий собой интенсивность измельчения, определяется конструктивно-кинематическими параметрами устройства, которые обеспечивают соответствующие вероятности встречи частицы с ножом и последующего разрушения (резания). В общем виде интенсивность измельчения определяется произведением

$$\mu_{\text{изм}} = q_1 q_2,$$

где  $q_1$  — вероятность встречи частицы корма с ножом;

$q_2$  — вероятность разрушения частицы корма при встрече с ножом.

Поскольку частицы корма в рабочей камере сориентированы в пространстве случайным образом, то вероятность их встречи с активными рабочими органами измельчителя определяется по формуле [4]

$$q_1 = \frac{2 \arctg(l_{\text{нож}} / a)}{\pi},$$

где  $l_{\text{нож}}$  — длина проекции режущей кромки ножа на плоскость противорезающей пластины, м;

$a$  — расстояние между режущими кромками смежных ножей, м.

Длина проекции режущей кромки ножа на плоскость противорезающей пластины может быть рассчитана по зависимости

$$l_{\text{нож}} = r_{\text{сер}} \cos \alpha_{\text{сер}} - \Delta, \quad (3)$$

где  $r_{\text{сер}}$  — длина активной части противорезающего элемента, м;

$\alpha_{\text{сер}}$  — угол наклона противорезающего элемента ко внутренней поверхности рабочей камеры, рад;

$\Delta$  — зазор между торцом ножа и внутренней поверхностью рабочей камеры, м.

С учетом формулы (3) вероятность встречи частицы корма с ножом запишется в следующем виде:

$$q_1 = \frac{2 \arctg \left[ (r_{\text{сег}} \cos \alpha_{\text{сег}} - \Delta) / a \right]}{\pi}.$$

Вероятность разрушения частиц корма определяется по формуле

$$q_2 = 1 - \frac{v_{\text{кор}}}{v_{\text{нож}}}, \quad (4)$$

где  $v_{\text{кор}}$  — скорость перемещения корма внутри рабочей камеры, м / с;

$v_{\text{нож}}$  — окружная скорость ножа, м / с.

Скорость перемещения корма внутри рабочей камеры в общем виде можно определить по формуле

$$v_{\text{кор}} = \frac{Q}{S_{\text{кам}} \rho},$$

где  $Q$  — производительность измельчителя, кг / с;

$S_{\text{кам}}$  — площадь поперечного сечения рабочей камеры, м<sup>2</sup>;

$\rho$  — плотность корма в рабочей камере, кг / м<sup>3</sup>.

Площадь поперечного сечения рабочей камеры зависит как от ее диаметра, так и от геометрических параметров ножевого ротора и противорежущих элементов:

$$S_{\text{кам}} = \left[ \frac{\pi}{4} (D_{\text{кам}}^2 - d_{\text{рот}}^2) - l_{\text{нож}} b_{\text{нож}} z_{\text{нож}} - \pi r_{\text{сег}}^2 z_{\text{сег}} \cos \alpha_{\text{сег}} \right] z_{\text{яр}}, \quad (5)$$

где  $D_{\text{кам}}$  — диаметр рабочей камеры, м;

$d_{\text{рот}}$  — диаметр ротора измельчителя, м;

$l_{\text{нож}}, b_{\text{нож}}, z_{\text{нож}}$  — длина (м), ширина (м) и количество ножей;

$z_{\text{сег}}$  — количество противорезов в ярусе;

$z_{\text{яр}}$  — количество ярусов ножей и противорежущих пластин в рабочей камере.

Поставив в выражение (4) площадь поперечного сечения рабочей камеры из формулы (5), определим скорость перемещения корма внутри рабочей камеры:

$$v_{\text{кор}} = \frac{Q}{\left[ \frac{\pi}{4} (D_{\text{кам}}^2 - d_{\text{рот}}^2) - l_{\text{нож}} b_{\text{нож}} z_{\text{нож}} - \pi r_{\text{сег}}^2 z_{\text{сег}} \cos \alpha_{\text{сег}} \right] z_{\text{яр}} \rho}.$$

Поскольку в вертикально расположенной рабочей камере многоплоскостного измельчающего аппарата корм перемещается в сторону выгрузной камеры по винтовой линии, полная скорость перемещения корма

$$v_{\text{ч. кор}} = v_{\text{кор}} \cos \alpha_{\text{кор}} = \frac{Q \cos \alpha_{\text{кор}}}{\left[ \frac{\pi}{4} (D_{\text{кам}}^2 - d_{\text{рот}}^2) - l_{\text{нож}} b_{\text{нож}} z_{\text{нож}} - \pi r_{\text{сег}}^2 z_{\text{сег}} \cos \alpha_{\text{сег}} \right] z_{\text{яр}} \rho}, \quad (6)$$

где  $\alpha_{\text{кор}}$  — угол наклона траектории движения корма по внутренней поверхности рабочей камеры, рад.

Выразив окружную скорость ножей как  $v_{\text{нож}} = \omega r_{\text{нож}}$ , где  $\omega$  — угловая скорость ротора, рад / с;  $r_{\text{нож}}$  — радиус ножа, м, и подставив в формулу (4) значения составляющих, получим зависимость, определяющую вероятность разрушения частиц корма:

$$q_2 = 1 - \frac{Q \cos \alpha_{\text{кор}}}{\left[ \frac{\pi}{4} (D_{\text{кам}}^2 - d_{\text{рот}}^2) - l_{\text{нож}} b_{\text{нож}} z_{\text{нож}} - \pi r_{\text{сер}}^2 z_{\text{сер}} \cos \alpha_{\text{сер}} \right] z_{\text{яр}} \rho \omega r_{\text{нож}}}$$

Интенсивность измельчения  $\mu_{\text{изм}}$  с учетом формулы (6) запишется в следующем виде:

$$\mu_{\text{изм}} = \frac{2 \operatorname{arctg} \left[ (r_{\text{сер}} \cos \alpha_{\text{сер}} - \Delta) / a \right]}{\pi} \times \left[ 1 - \frac{Q \cos \alpha_{\text{кор}}}{\left[ \frac{\pi}{4} (D_{\text{кам}}^2 - d_{\text{рот}}^2) - l_{\text{нож}} b_{\text{нож}} z_{\text{нож}} - \pi r_{\text{сер}}^2 z_{\text{сер}} \cos \alpha_{\text{сер}} \right] z_{\text{яр}} \rho \omega r_{\text{нож}}} \right] \quad (7)$$

Из формулы (2) следует, что вероятность измельчения частицы корма зависит от времени  $t_{\text{ч}}$  ее нахождения в рабочей камере, определяемого формулой

$$t_{\text{ч}} = t_{\text{п}} + t_{\text{пр}}, \quad (8)$$

где  $t_{\text{п}}$  — время перемещения частицы корма по внутренней поверхности рабочей камеры, с;  $t_{\text{пр}}$  — время перемещения частицы корма по поверхности противорежущих элементов, с. Время  $t_{\text{п}}$  можно определить по формуле

$$t_{\text{п}} = \frac{l_{\text{п}}}{v_{\text{ч. кор}}},$$

где  $l_{\text{п}}$  — расстояние, преодолеваемое частицей в ходе движения внутри рабочей камеры, м. Расстояние  $l_{\text{п}}$  определим по формуле

$$l_{\text{п}} = 2\pi R_{\text{к}}, \quad (9)$$

где  $R_{\text{к}}$  — радиус рабочей камеры, м.

С учетом формул (6) и (9) время  $t_{\text{п}}$  перемещения частицы корма по внутренней поверхности рабочей камеры запишется в виде

$$t_{\text{п}} = \frac{2\pi R_{\text{к}} \left[ \frac{\pi}{4} (D_{\text{кам}}^2 - d_{\text{рот}}^2) - l_{\text{нож}} b_{\text{нож}} z_{\text{нож}} - \pi r_{\text{сер}}^2 z_{\text{сер}} \cos \alpha_{\text{сер}} \right] z_{\text{яр}} \rho}{Q \cos \alpha_{\text{кор}}} \quad (10)$$

Время  $t_{\text{пр}}$  перемещения частицы корма по поверхности противорежущих элементов определяется отношением

$$t_{\text{пр}} = \frac{l_{\text{пр}}}{v_{\text{пр}}},$$

где  $l_{\text{пр}}$  — расстояние, проходимое частицей корма по рабочей части противореза, м;  $v_{\text{пр}}$  — скорость перемещения частицы корма по рабочей части противореза, м / с.

Расстояние  $l_{\text{пр}}$  выразим формулой

$$l_{\text{пр}} = r_{\text{сер}} z_{\text{сер}} \cos \alpha_{\text{сер}}. \quad (11)$$

С учетом формулы (11) время  $t_{\text{пр}}$  перемещения частицы корма по поверхности противорежущих элементов запишется в виде

$$t_{\text{пр}} = \frac{r_{\text{сер}} z_{\text{сер}} \cos \alpha_{\text{сер}}}{v_{\text{пр}}}. \quad (12)$$

Подставив в выражение (8) значения слагаемых из формул (10) и (12), получим отношение

$$t_{\text{ч}} = \frac{2\pi R_{\text{к}} \left[ \frac{\pi}{4} (D_{\text{кам}}^2 - d_{\text{рот}}^2) - l_{\text{нож}} b_{\text{нож}} z_{\text{нож}} - \pi r_{\text{сер}}^2 z_{\text{сер}} \cos \alpha_{\text{сер}} \right] z_{\text{яр}} \rho}{Q \cos \alpha_{\text{кор}}} + \frac{r_{\text{сер}} z_{\text{сер}} \cos \alpha_{\text{сер}}}{v_{\text{пр}}}. \quad (13)$$

Подстановка значений интенсивности измельчения  $\mu_{\text{изм}}$  и времени нахождения частицы корма в рабочей камере  $t_{\text{ч}}$ , определяемых по формулам (7) и (13), в выражение (2) позволит определить вероятность измельчения частицы  $P_{\text{и}}$ , зная которую, можно по формуле (1) рассчитать размер  $l_{\text{изм}}$  частиц корма на выходе из плоскостного роторного измельчающего аппарата вертикального типа.

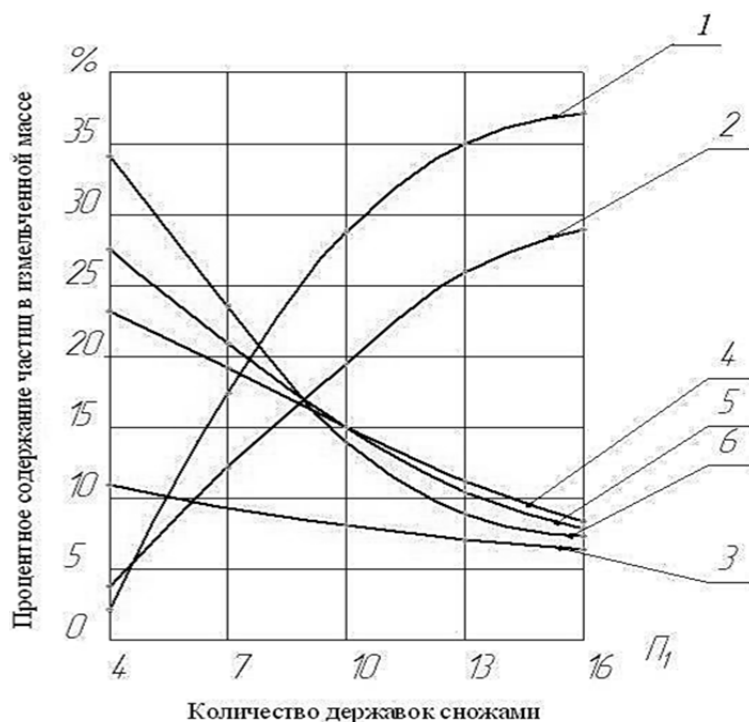
Анализ полученной математической модели показывает, что вероятность измельчения частицы корма возрастает при увеличении длины ножей и противорежущих элементов. Конструктивно это выполнить сложно, так как в этом случае увеличивается диаметр рабочей камеры измельчителя. Более простым путем является увеличение количества закрепленных на роторе ножей или установленных по внутреннему периметру рабочей камеры противорежущих элементов.

Изучив характер влияния составляющих математической модели, принято решение увеличить вероятность измельчения частиц  $P_{\text{изм}}$  за счет изменения числа режущих элементов. Для проверки выдвинутой гипотезы изготовлен плоскостной роторный измельчающий аппарат вертикального типа с конструкцией ротора, позволяющей варьировать количество его ножей в пределах от 4 до 16 шт.

Проведенные экспериментальные исследования измельчения зеленой массы показали, что с увеличением количества ножей в рабочей камере измельчителя доля мелкой фракции частиц увеличивается (рисунок 2). В этом случае частицы корма чаще попадают в рабочую зону режущих элементов. Данная зависимость прослеживается и в исследованиях рабочего процесса измельчителя-смесителя ИС-20 [5].

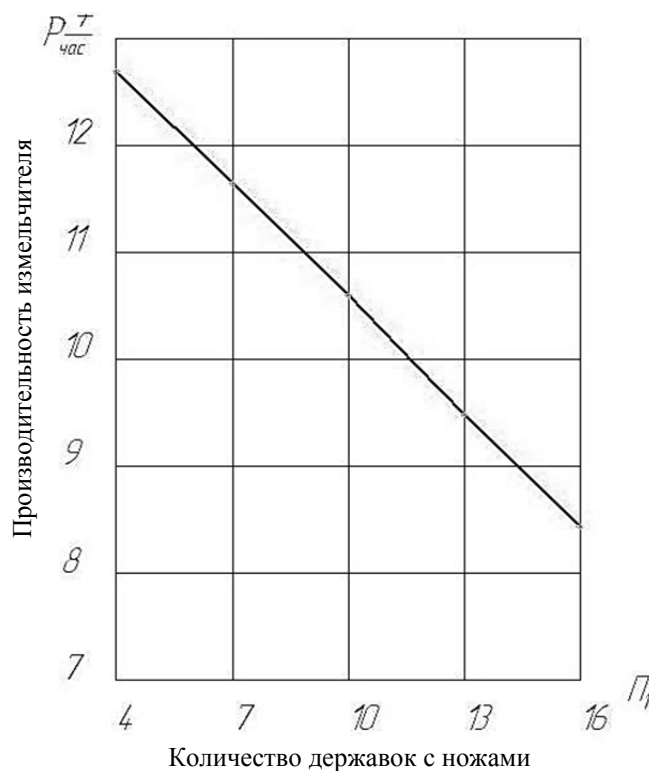
Однако с увеличением числа режущих элементов появляются и негативные факторы. Из графической зависимости на рисунке 3 видно, что по мере увеличения количества державок с ножами производительность измельчителя снижается. Это вызвано тем, что опорные пластины перекрывают свободный просвет рабочей камеры.

Вторым отрицательным моментом является рост удельной энергоемкости процесса измельчения, объясняемый тем, что с увеличением числа державок с ножами уменьшается пространство между ними, возрастает переносная скорость массы и время пребывания частиц в рабочей зоне ножей и противорежущих элементов.

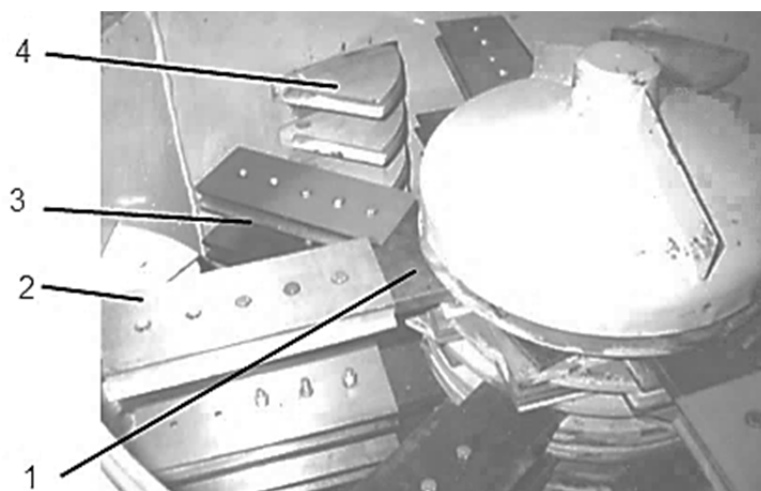


1 — фракция частиц размером менее 5 мм; 2 — 5...10 мм; 3 — 10...15 мм; 4 — 15...20 мм; 5 — 20...30 мм; 6 — более 30 мм

**Рисунок 2. — Зависимость размеров частиц зеленой массы от числа установленных на роторе измельчителя ножей**



**Рисунок 3. — Зависимость производительности измельчителя от количества установленных на роторе ножей**



1 — державка; 2 — верхний нож; 3 — нижний нож;  
4 — противорежущий элемент

**Рисунок 4. — Рабочий орган измельчителя кормов**

Вместе с тем полученные результаты позволили начать поиск рациональной конструкции рабочего органа. В результате предложена более простая и пригодная для измельчения кормов конструкция рабочего органа (рисунок 4).

Рабочий орган содержит два параллельных режущих ножа, закрепленных на одной державке, а следовательно, число воздействий на частицу увеличено вдвое. Данная конструкция позволила увеличить на 50 % вероятность встречи частиц корма с режущим элементом. Новизна конструкции ножа защищена патентом [6].

**Заключение.** Вероятность измельчения частицы корма возрастает при увеличении числа закрепленных на роторе ножей или установленных по внутреннему периметру рабочей камеры противорежущих элементов. Однако с увеличением числа ножей по периметру рабочей камеры уменьшается производительность измельчителя. Это вызвано тем, что дополнительные ножи перекрывают просвет рабочей камеры. С увеличением числа ножей уменьшается пространство между ними, возрастает переносная скорость массы и время пребывания частиц в рабочей зоне ножей и противорежущих элементов, как следствие, возрастает удельная энергоемкость выполняемого процесса.

В целях минимизации негативных эффектов при увеличении количества ножей ротора предложен рабочий орган, содержащий два параллельных режущих ножа, закрепленных на одной державке, что увеличивает на 50 % вероятность встречи частиц корма с режущим элементом плоскостного роторного измельчающего аппарата.

#### Список цитированных источников

1. Надежин, А. В. К обоснованию геометрических параметров измельчителей стебельчатых кормов / А. В. Надежин // Совершенствование технологий и технических средств в животноводстве : сб. науч. тр. — Зерноград, 1988. — 140 с.

2. Овчинников, А. А. К вопросу обоснования конструктивно-режимных параметров измельчителя-смесителя непрерывного действия / А. А. Овчинников, Е. В. Сурменев, А. В. Влазнев // Механизация заготовки, приготовления и раздачи кормов : сб. науч. тр. — Саратов, 1982. — С. 74—82.

3. Передня, В. И. Определение параметров универсального измельчителя кормов / В. И. Передня, В. Романюк, А. В. Китун // Problemy intensyfikacji produkcji zwierzecej z uwzględnieniem ochrony środowiska i prze-



pisow UE : VII Miedzynarodowa Konferencja Naukowa, Warszawa, 23—48 września 2001 r. / Institut Budownictwa, Mechanizacji Rolnictwa ; red. E. Bieñ [i dr.]. — Warszawa. — 2001. — P. 391—398.

4. *Передня, В. И.* Механизация приготовления полноценных кормосмесей в поточных линиях для эффективного использования кормов на скотоводческих фермах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / В. И. Передня. — Минск, 1984. — 320 л.

5. *Голиков, В. А.* Рабочий орган для измельчения грубых кормов повышенной влажности / В. А. Голиков // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. — 1978. — № 11. — С. 17—19.

6. Рабочий орган измельчителя кормов : пат. 1523 Респ. Беларусь : МПК7 А 01 F 29/00 / А. В. Китун, В. И. Передня ; заявитель Белорус. гос. аграрный ун-т. № u 20040022 ; дата публ.: 30.09.04 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлект. уласнасці. — 2004. — № 3. — С. 144.

Поступила в редакцию 18.02.2022.