



## Методика расчета длины резки растений кормоуборочными комбайнами: роторным и двойного измельчения

**М. И. Белов**

*ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»  
(г. Москва, Россия)*

*B-Mikhael@yandex.ru*

*Введение.* Результаты многочисленных исследований доказывают, что качество корма из измельченных растений зависит от качества измельчения, которое обеспечивается кормоуборочным комбайном и определяется путем взвешивания фракций частиц разной длины. Представляет интерес теоретическое обоснование режимов измельчения трав на сенаж и другие виды кормов. Целью данной статьи является разработка алгоритма и методики оценки качества измельчения растений на основе математической модели измельчения кормоуборочным комбайном с роторным измельчающе-швыряющим аппаратом и кормоуборочным комбайном двойного измельчения (с двойным измельчающим аппаратом).

*Материалы и методы.* Изложены необходимые положения теории роторного измельчающего аппарата и двойного измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна, на основе которых разработаны алгоритмы, методика расчета массовой доли частиц в заданных диапазонах длины и компьютерная модель измельчения.

*Результаты исследования.* Представлены алгоритмы и методика расчета массовой доли частиц растений, измельченных роторным аппаратом и двойным измельчающим аппаратом. Установлена связь массовой доли частиц в заданных диапазонах длины с высотой растений, высотой среза, подачей, средней расчетной длиной резки.

*Обсуждение и заключение.* Кормоуборочные комбайны с роторным измельчающе-швыряющим аппаратом не позволяют обеспечить заготовку трав на сенаж с массовой долей частиц длиной 8–19 мм в пределах от 45 % до 65–75 %, комбайны с двойным измельчающим аппаратом дают такую возможность только при регулировании угловой скорости шнека и/или дискового или цилиндрического барабана. Двойной измельчающий аппарат позволяет выполнить требования к качеству измельчения разных кормов, если предусмотрено регулирование угловой скорости шнека и/или дискового или цилиндрического барабана.

**Ключевые слова:** кормоуборочный комбайн, измельчающий аппарат, закон распределения частиц по длине, качество измельчения, длина резки, длина частиц, роторный комбайн, комбайн двойного измельчения

**Для цитирования:** Белов М. И. Методика расчета длины резки растений кормоуборочными комбайнами: роторным и двойного измельчения // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 279–294. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.279-294>



## The Method of Calculating Cut Length for Flail and Double Chop Forage Harvesters

M. I. Belov

*Russian Timiryazev State Agrarian University (Moscow, Russia)*

*B-Mikhael@yandex.ru*

*Introduction.* Many studies show that the chopped feed quality depends on the plants chopping quality. The quality of plant chopping, provided by a forage harvester, is defined by particle length distribution. It is important to find the theoretical basis of grass chopping regimes for making haylage and other kinds of feeds. The purpose of this study is to develop an algorithm and techniques to assess the quality of plant chopping based on mathematical models of chopping with the flail and double chop forage harvesters.

*Materials and Methods.* Mathematical models of a flail type unit and double chop unit were presented and used to develop the algorithms and method of calculating the cut length distribution.

*Results.* The algorithms and computation methods of cut length distribution were presented for a flail type unit and a double chop unit. The effect of the plant height, the height of cut, feed and the average length of cut on the mass fraction of particles within the specified ranges of lengths were investigated.

*Discussion and Conclusion.* A flail forage harvester is not able to harvest the grass crops for making haylage with 45–75 % forage particles, the length of which is in the range from 8 mm to 19 mm. A double chop forage harvester allows harvesting the grass crops for making haylage only when auger angular velocity and/or flywheel or cylinder drum angular velocity is regulated. A double chop device can be used to chop plants for preparation of various forages if auger angular velocity and/or flywheel or cylinder drum's angular velocity is regulated.

**Keywords:** forage harvester, chopper unit, particle length distribution, grinding quality, cut length, particle length, flail harvester, double chop harvester

**For citation:** Belov M.I. The Method of Calculating Cut Length for Flail and Double Chop Forage Harvesters. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):279-294. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.279-294>

### Введение

Измельчение – главная операция, выполняемая кормоуборочным комбайном, и основной критерий эффективности его работы – выполнение агротехнических требований по качеству измельчения растений. Агротехнические требования по качеству измельчения растений регламентируют массовые доли фракций частиц в заданных диапазонах длины.

Результаты многочисленных исследований доказывают, что качество корма, изготовленного с помощью кормоуборочного комбайна, зависит от

качества измельчения растений [1–4], упрощенная методика оценки которого предполагает использование сепаратора частиц, содержащего три решета. Современные рекомендации к качеству измельчения трав на сенаж состоят в обеспечении следующих показателей массовой доли частиц: на верхнем решете с круглыми отверстиями диаметром 19 мм – 10–20 %, на среднем решете с круглыми отверстиями диаметром 8 мм – 45–75 %, на нижнем решете с квадратными отверстиями размером 1,3 мм – 10–20 %, под нижним решетом на нижней панели сепарато-

ра – менее 5 %<sup>1</sup>. Представляет интерес определение режимов, обеспечивающих требуемое качество измельчения трав на сенаж. Задача определения качества измельчения сводится при этом к нахождению функции распределения массовой доли частиц по длине и может быть решена построением компьютерной модели измельчения растений.

Целью данной статьи является разработка алгоритма и методики оценки качества измельчения растений на основе математической модели измельчения роторным кормоуборочным комбайном и кормоуборочным комбайном двойного измельчения.

### Обзор литературы

Качество измельчения растений, оцениваемое весовым содержанием фракций частиц в разных диапазонах длины, можно рассчитать посредством нахождения функции распределения массовой доли частиц по длине. Анализом разделения растений на части при их резании и измельчении кормоуборочными комбайнами занимались многие ученые.

Математическое представление функции распределения по длине массовой доли частиц растений, измельченных кормоуборочными комбайнами, с помощью функций нормального и логнормального распределения изучено в ряде исследований [5–7]. Кроме того, отмечалось, что распределение массовой доли частиц по длине не является нормальным; предлагалось представлять плотность распределения в виде суммы функций параболического и экспоненциального типа [8]. Японские ученые предложили математическую модель измельчения растений роторным кормоуборочным комбайном при низком

и высоком стеблестое кукурузы и сорго [9]. Данная модель не учитывает многократное перерезание наклонных стеблей, сдвинутых передним щитком.

Вопрос о функции распределения массовой доли частиц растений, измельченных кормоуборочными комбайнами двойного измельчения, недостаточно изучен.

Измельчающие и измельчающе-швыряющие аппараты современных кормоуборочных комбайнов традиционно разделяются на две категории: аппараты, обеспечивающие точную (расчетную) длину резки, и не обеспечивающие ее<sup>2</sup>. Признаком первой категории является тип подачи растений в камеру измельчающего или измельчающе-швыряющего аппарата, при котором растения сжимаются и подаются сжатым слоем между вальцами питающего аппарата. Признаком второй категории служит подача растений в камеру измельчителя не вальцами питающего аппарата, а другим способом (как правило, шнеком).

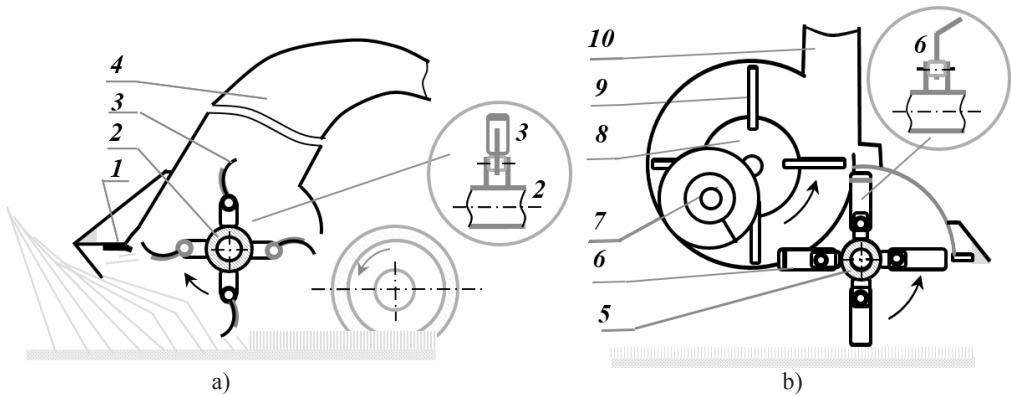
Классифицируя комбайны на рынке в 1980-е гг., С. Хоу и Т. Бишоп отметили семь групп, главным отличием которых друг от друга был тип измельчающего аппарата [10]. Роторные кормоуборочные комбайны и комбайны двойного измельчения занимали и занимают нишу машин, используемых в малых хозяйствах на заготовке зеленых кормов [11; 12].

1. Роторный кормоуборочный комбайн оснащен роторным измельчающе-швыряющим аппаратом со швырковыми ножами (рис. 1, а).

2. Роторный кормоуборочный комбайн со швырялкой оснащен роторным измельчающим аппаратом с режущими

<sup>1</sup> From harvest to feed: understanding silage management / C. M. Jones [et al.]. Penn State's College of Agricultural Science. 2004. 34 p. URL: [http://pss.uvm.edu/pdpforage/Materials/CuttingMgt/From\\_Harvest\\_to\\_Feed\\_Understanding\\_Silage\\_management\\_PennState.pdf](http://pss.uvm.edu/pdpforage/Materials/CuttingMgt/From_Harvest_to_Feed_Understanding_Silage_management_PennState.pdf); **Wiersma D.** Theoretical length of cut: Theory and practice // Progressive Dairyman Canada. 2013. URL: <https://www.progressivedairyman.com/topics/feed-nutrition/theoretical-length-of-cut-theory-and-practice>

<sup>2</sup> Engineering principles of agricultural machines. – 2<sup>nd</sup> ed. / A. K. Srivastava [et al.]. ASAE. 2006. 604 p. URL: [https://fcaib.edu.ng/books/Engineering/%5BAjit\\_K.\\_Srivastava\\_\\_Carroll\\_E.\\_Goering%5D\\_Engineer\(BookFi.org\).pdf](https://fcaib.edu.ng/books/Engineering/%5BAjit_K._Srivastava__Carroll_E._Goering%5D_Engineer(BookFi.org).pdf)



Р и с. 1. Схемы кормоуборочных комбайнов с роторным измельчающе-швыряющим аппаратом (а) и с роторным измельчающим аппаратом в комплекте со швырлякой (б):  
 1 – противорежущий брус; 2 – ротор; 3 – швыряющий нож; 4 – выгрузной трубопровод; 5 – ротор; 6 – режущий Г-образный нож; 7 – шнек; 8 – швырляка; 9 – лопасть швырляки; 10 – выгрузной трубопровод

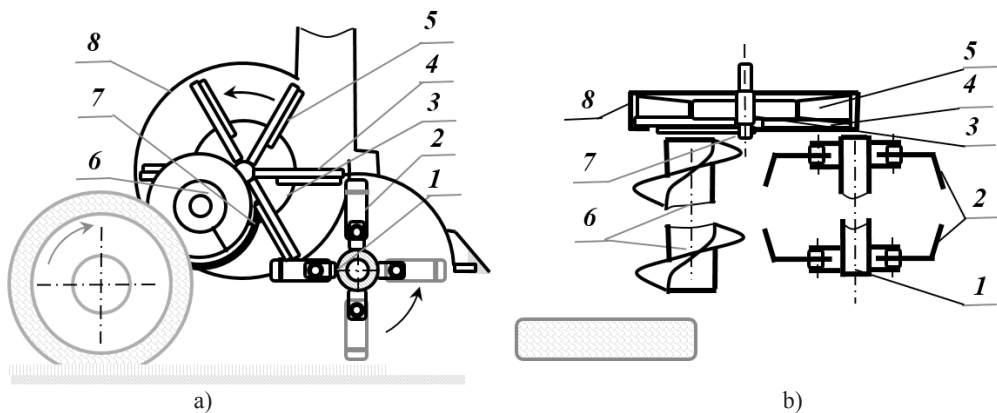
Fig. 1. A traditional flail forage harvester (a) and a flail forage harvester with a blower (b):  
 1 – shearbar; 2 – rotary cutter; 3 – throwing knife; 4 – discharge pipe; 5 – rotary cutter; 6 – L-shape knife; 7 – auger; 8 – blower; 9 – blower blade; 10 – discharge pipe

ножами (рис. 1, б). Измельченные растения сначала выгружаются в шнек и затем шнеком подаются в швырляку.

3. Кормоуборочный комбайн двойного измельчения оснащен роторным измельчающим аппаратом и дисковым

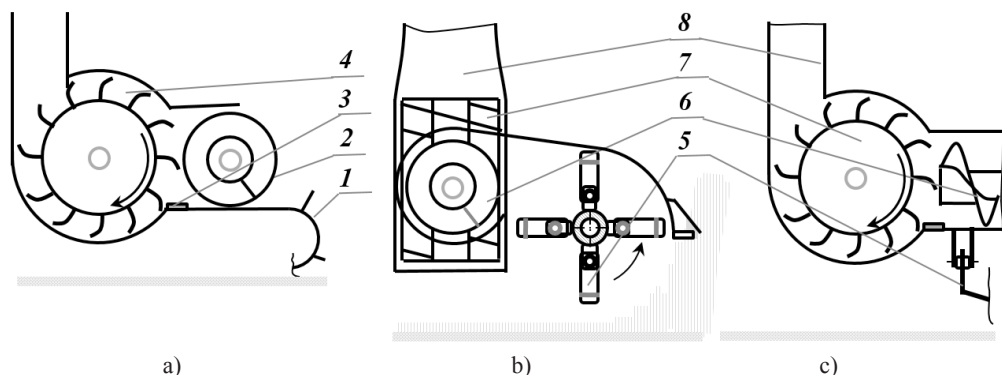
измельчающе-швыряющим аппаратом (рис. 2).

4. К кормоуборочным комбайнам, не обеспечивающим точную длину резки, относятся комбайны с цилиндрическим измельчающе-швыряющим



Р и с. 2. Кормоуборочный комбайн двойного измельчения с роторным измельчающим аппаратом и дисковым измельчающе-швыряющим аппаратом при виде слева (а) и сверху (б):  
 1 – роторный измельчающий аппарат; 2 – режущие Г-образные ножи; 3 – дисковый измельчающе-швыряющий аппарат; 4 – ножи дискового аппарата; 5 – швырковые лопатки дискового аппарата; 6 – шнек; 7 – противорежущие брусья; 8 – кожух дискового измельчающе-швыряющего аппарата и выгрузной трубопровод

Fig. 2. A double chop forage harvester with a rotary cutter and with a flywheel cutterhead on the left side (a) and on the top (b): 1 – rotary cutter; 2 – L-shape blades; 3 – flywheel cutter-head; 4 – blades of a flywheel cutterhead; 5 – throwing paddles of a flywheel cutterhead; 6 – auger; 7 – a shearbars; 8 – flywheel cutterhead case and discharge pipe



Р и с. 3. Схема кормоуборочного комбайна с цилиндрическим измельчающе-швыряющим аппаратом (а) и комбайна двойного измельчения с роторным аппаратом и цилиндрическим измельчающе-швыряющим аппаратом при виде сбоку (b) и спереди (с):

1 – подборщик; 2 – шнек; 3 – противорежущий брус; 4 – цилиндрический измельчающе-швыряющий аппарат; 5 – нож роторного измельчающего аппарата; 6 – шнек; 7 – цилиндрический измельчающе-швыряющий аппарат; 8 – выгрузной трубопровод

Fig. 3. A forage harvester with a cylinder cutterhead (a) and a double chop forage harvester with a rotary cutter and with a cylinder cutterhead on the left side (a) and from the front (b): 1 – pick up; 2 – auger; 3 – shearbar; 4 – cylinder type cutterhead with throwing blades; 5 – knife of a rotary cutter; 6 – auger; 7 – cylinder type cutterhead with throwing blades; 8 – discharge pipe

аппаратом, в камеру которого растения подаются шнеком (рис. 3, а) [10].

5. Разновидностью комбайнов двойного измельчения является комбайн с роторным измельчающим аппаратом и цилиндрическим измельчающе-швыряющим аппаратом (рис. 3, б–с) [Там же].

### Материалы и методы

Методика оценки качества измельчения реализована в виде компьютерной модели измельчения растений роторным кормоуборочным комбайном и кормоуборочным комбайном двойного измельчения, разработанной в среде Lazarus 1.8.4. Математическая модель и алгоритмы расчета фракционного состава частиц измельченных растений изложены далее. В расчетах использованы данные современных комбайнов (табл. 1).

### Результаты исследования

*Математическая модель резания растений ножами роторного измельчающего аппарата*

Рассмотрим роторный измельчающе-швыряющий аппарат. Введем следующие обозначения:  $s_m$  – наибольшая длина отрезанных частиц растения,

срезанного на корню и перерезаемого в третий раз и далее, мм;  $L$  – заданная длина отрезка, мм;  $M_L$  – масса частиц растений заданной совокупности, длина каждой из которых не превышает  $L$ , кг;  $M_T$  – масса частиц растений заданной совокупности, кг;  $m_L$  – массовая доля частиц растений заданной совокупности, длина каждой из которых не превышает  $L$ , %;  $m$  – массовая доля частиц растений заданной совокупности, длина каждой из которых находится в пределах от 8 до 19 мм, %. Прочие обозначения указаны на рис. 4.

Будем считать, что ножи роторного комбайна измельчают первоначально прямостоящие вертикальные стебли.

Запишем соотношения между параметрами ( $H - h$ ),  $s$ ,  $R$ ,  $k$  [13]:

$$\lambda s = (2\pi / k) R, \quad (1)$$

$$\lambda \sin \theta = \pi / k + \theta, \quad (2)$$

где  $\theta$  – параметр, обозначающий угол, показанный на рис. 4, а.

Примем, что начало  $O$  неподвижной системы координат расположено на оси

Таблица 1  
Table 1

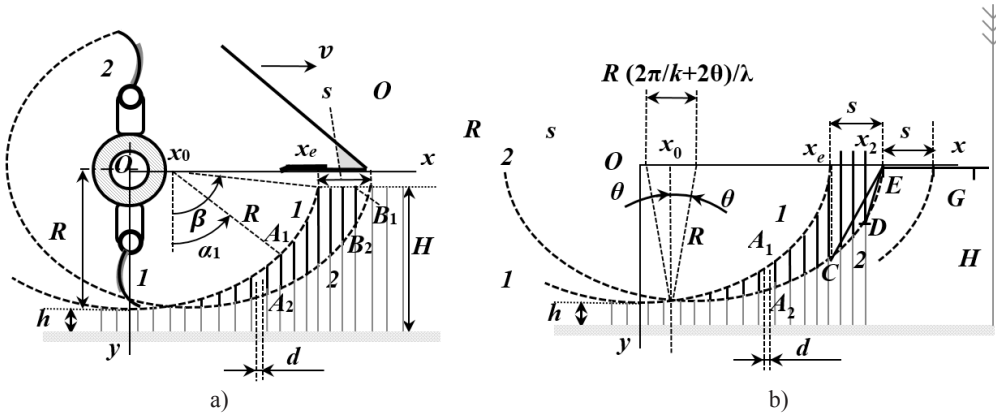
**Модели и параметры роторных кормоуборочных комбайнов и комбайнов двойного измельчения  
Flail forage harvesters and double chop forage harvesters models and parameters**

Компания, модель (и) / Company, model (s)	Номер рисун- ка / Figure no.	Радиус R ротора, мм / Rotor radius R, mm	Число k ножей на роторе в плоско- сти вращения / Number k of flail knives in rotation plane	Угловая ω скорость ротора, об/мин / Angular velocity ω of a rotor, rpm	Скорость v в комбайна, км/час / Speed v of a tractor, km/h	Диаметр D ди- скового измель- чающе-пшвыря- ющего аппарата по краям ножей, мм / Diameter D of a flywheel cut- terhead, mm	Угловая ско- рость ω диска, об/мин / Angu- lar velocity ω <sub>d</sub> of a flywheel cutterhead, rpm	Число n ножей дискового аппа- рата / Number n of flywheel cut- terhead knives	Ширина W приемной горловины дискового аппарата, мм / Fly- wheel chopper input throat width W <sub>c</sub> , mm
Staalmeester GH 130 <sup>3</sup>	1	н/д / н.а.	1	н/д / н.а.	8-10	–	–	–	–
Hiniker 5710 <sup>4</sup>	1	307*	1	1 503*	н/д / н.а.	–	–	–	–
Celikel Tarim 1300; 1500 <sup>5</sup>	1	н/д / н.а.	1	1 350	н/д / н.а.	–	–	–	–
Кормамаш КИР-1,5М / Kormmash KIR-1,5M <sup>6</sup>	1	286	1	1 500	≤8	–	–	–	–
FIMAX RF 132; RF 152 <sup>7</sup>	1	н/д / н.а.	н/д / н.а.	н/д / н.а.	н/д / н.а.	–	–	–	–
John Deere 72 <sup>8</sup>	2	н/д / н.а.	2	1 366	н/д / н.а.	н/д / н.а.	800	3(6)	246
New Holland 38 <sup>9</sup>	2	н/д / н.а.	н/д / н.а.	1 373	н/д / н.а.	н/д / н.а.	966	3(6)	н/д / н.а.
Staalmeester DS 540 <sup>10</sup>	2	н/д / н.а.	2	1 655	н/д / н.а.	810	1 258	6	н/д / н.а.
Elho DC2100 S <sup>11</sup>	2	н/д / н.а.	2	2 000	н/д / н.а.	н/д / н.а.	1 080	8	н/д / н.а.
Fimax 1500; 2100 <sup>12</sup>	2	н/д / н.а.	2	н/д / н.а.	н/д / н.а.	н/д / н.а.	н/д / н.а.	6	н/д / н.а.
Ростсельмаш Стерх 2000 / Rostselmash Sterh 2000 <sup>13</sup>	2	н/д / н.а.	1	1 500	н/д / н.а.	н/д / н.а.	1 000	6	н/д / н.а.

Примечание: \* – расчетное значение; н/д – нет данных / Note: \* – calculated data; н.а. – not available

<sup>3</sup> Celmak Forage Harvesters. URL: [http://www.staalmeester.co.za/Celmak\\_forage\\_harvesters.html](http://www.staalmeester.co.za/Celmak_forage_harvesters.html)
<sup>4</sup> 5710 Flail Mower/Shredder. URL: [https://www.hiniker.com/ag\\_products%20new/5710flailmower.html](https://www.hiniker.com/ag_products%20new/5710flailmower.html); Flail chopper shredder Model 5710 (with identification no.'s ending 100 and higher) : Operator's manual. URL: [https://www.hiniker.com/ag\\_products%20new/manuals/Operator's%20Manuals/79202099.pdf](https://www.hiniker.com/ag_products%20new/manuals/Operator's%20Manuals/79202099.pdf)
<sup>5</sup> Forage harvester. URL: <http://www.celikeltarim.com/en/forage-harvester.html>
<sup>6</sup> Косилка-измельчитель роторная КИР-1,5М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. URL: [http://agtz.ru/upload/iblock/420/Rukovodstvo-po-ekspluatatsii-KIR-1\\_5.pdf](http://agtz.ru/upload/iblock/420/Rukovodstvo-po-ekspluatatsii-KIR-1_5.pdf)
<sup>7</sup> Fimaks silaj makineleri. URL: <http://fimaks.com/wp-content/uploads/2018/03/Silaj-Makineleri-K.pdf>
<sup>8</sup> Hay and Forage Harvesting Equipment. URL: <https://www.deere.com/en/hay-forage/harvesting>
<sup>9</sup> Pull-type forage harvesters and flail harvester. URL: <http://d3u1qurakt94yp.cloudfront.net/nhag/nar/en-us/assets/pdf/hay-tools/pull-type-forage-harvester-brochure-us-en.pdf>
<sup>10</sup> Celmak Forage Harvesters. URL: [http://www.staalmeester.co.za/Celmak\\_forage\\_harvesters.html](http://www.staalmeester.co.za/Celmak_forage_harvesters.html)
<sup>11</sup> Forage Harvesters. URL: <https://www.elho.fi/products/forage-harvesters>
<sup>12</sup> Fimaks silaj makineleri. URL: <http://fimaks.com/wp-content/uploads/2018/03/Silaj-Makineleri-K.pdf>
<sup>13</sup> Кормоуборочные комбайны. URL: [https://rostselmash.com/products/forage\\_harvesters](https://rostselmash.com/products/forage_harvesters)





Р и с. 4. Резание невысоких (а) и высоких растений, высота которых превышает расстояние от оси ротора до их основания (б): 1; 2 – траектории точек лезвий соседних ножей 1 и 2 на одной окружности;  $A_1A_2, B_1B_2, CE, DE, EG$  – отрезки растений после срезания ножом;  $Oxy$  – неподвижная ортогональная система декартовых координат с горизонтальной осью  $Ox$  и вертикальной осью  $Oy$ , направленной вверх;  $k$  – число ножей в плоскости вращения;  $h$  – минимальная высота стеблей после срезания, мм;  $H$  – высота стеблей до срезания, мм;  $R$  – радиус ротора (расстояние от оси ротора до лезвия ножа), мм;  $d$  – шаг по оси  $Ox$ , мм;  $s$  – подача или перемещение ротора вдоль оси  $Ox$  за время поворота на угол, равный радиальному углу, образуемому соседними ножами в плоскости вращения, мм;  $\theta$  – угол (параметр), рад;  $\omega$  – угловая скорость ротора, рад/с;  $v$  – скорость точки оси ротора вдоль оси  $Ox$ , мм/с;  $\lambda$  – кинематический параметр ( $\lambda = R\omega/v$ );  $x_1, y_1$  – координаты  $x, y$  точки лезвия ножа 1;  $x_2, y_2$  – координаты  $x, y$  точки лезвия ножа 2;  $\beta$  – угол (параметр);  $\alpha_1$  – угол (параметр);  $x_0, x_e$  – дополнительные значения

F i g. 4. Low plants cutting (a) and cutting of high plants, whose height is greater than the distance from the axis of the rotor to the base of the plants (b): 1, 2 – trajectories of knife tips 1 and 2;  $A_1A_2, B_1B_2, CE, DE, EG$  – plant cuts after cutting by knife;  $Oxy$  – fixed orthogonal Cartesian coordinates with horizontal axis  $Ox$  and vertical upward axis  $Oy$ ;  $k$  – number of knives in the plane of rotation;  $h$  – minimal height of the stems after cutting;  $H$  – height of the stems before cutting;  $R$  – radius of a rotor;  $d$  – step in the  $Ox$  direction;  $s$  – distance between neighboring trajectories of knives along an axis  $Ox$ ;  $\theta$  – angle (parameter);  $\omega$  – angular velocity of the rotor;  $v$  – speed of the rotor axis point along an axis  $Ox$ ;  $\lambda$  – kinematic parameter ( $\lambda = R\omega/v$ );  $x_1, y_1$  –  $x, y$  coordinates of the point of the blade 1;  $x_2, y_2$  –  $x, y$  coordinates of the point of the blade 2;  $\beta$  – angle (parameter);  $\alpha_1$  – angle (parameter);  $x_0, x_e$  – additional values

ротора в тот момент, когда нож 1 находится в нижнем положении (рис. 4, а). Уравнения траектории 1 точки лезвия ножа 1 в параметрическом виде запишем следующим образом [Там же]:

$$\begin{cases} x_1 = R(\alpha_1 / \lambda + \sin \alpha_1) \\ y_1 = R \cos \alpha_1, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\alpha_1$  – параметр, обозначающий угол, показанный на рисунке 4, а ( $\alpha_1 \geq 0$ ).

Уравнение траектории 2 точки лезвия ножа 2 записываются аналогичным образом:

$$\begin{cases} x_2 = R[(\alpha_2 + 2\pi / k) / \lambda + \sin \alpha_2] \\ y_2 = R \cos \alpha_2, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\alpha_2$  – параметр, обозначающий угол, показанный на рисунке 4, а ( $\alpha_2 \geq -2\pi/k$ ).

Резание рассматривалось как множество циклов; за цикл принималось резание лезвием ножа 2 растений между траекториями 1 и 2.

Разделим фигуру между траекториями 1 и 2 на две части в пределах двух интервалов по оси  $Ox$ :

$$x_0 \leq x_1 \leq x_e, \quad (5)$$

$$x_e \leq x_2 \leq x_e + s, \quad (6)$$

где  $x_0$  – координата нижней точки пересечения траекторий 1 и 2 по оси  $Ox$ ;  $x_e$  – координата верхней точки пересечения траектории 1 со стеблем по оси  $Ox$ .

Следующее равенство можно использовать для определения  $x_0$  (рис. 4, б):

$$x_0 = R(\theta / \lambda + \sin \theta). \quad (7)$$

Величина  $x_e$  может быть найдена с помощью следующих формул (рис. 4, б):

$$x_e = \begin{cases} R(\beta / \lambda + \sin \beta), & 0 < H - h < R \\ R(0,5\pi / \lambda + 1), & H - h \geq R, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\cos \beta = (R + h - H) / R$ .

В пределах первого интервала ( $x_0 \leq x_1, x_2 \leq x_e$ ) длина  $u$  частицы равна длине отрезка  $A_1A_2$  (рис. 4):

$$u = y_2 - y_1, \quad (9)$$

где  $x_1, y_1, x_2, y_2$  можно определить из уравнений (3–4) и принять  $x_1 = x_2$ .

В пределах второго интервала  $x_e \leq x_2 \leq x_e + s$  длина  $u$  частицы зависит от высоты растений. Короткие растения ( $H - h \leq R$ ) не упираются в передний щиток и не сгибаются им перед срезанием. Длина  $u$  частиц коротких растений равна длине отрезка  $B_1B_2$  (рис. 4, а):

$$u = y_2 + H - h - R, \quad (10)$$

где  $y_2$  определяется из уравнений (4).

Примем, что:

1) высокие растения ( $H > R + h$ ) упираются в передний щиток и изгибаются перед щитком;

2) срезанное в нижней точке  $C$  высокое растение перерезается тем же ножом в режущей паре «нож – противорежущий брус» в точке  $E$ , если длина верхней части растения превышает длину отрезка  $CE$  (рис. 4, б);

3) оставшаяся после резания в точке  $E$  часть высокого растения в виде

отрезка  $EG$  перерезается следующими ножами в режущей паре «нож – противорежущий брус» на отрезки длиной  $s$  и последний отрезок, длина которого не превышает  $s$ .

Пусть  $N$  – число частей, равное числу резаний высокого растения от нижней точки  $C$  с координатами  $x_2, y_2$  ( $x_e \leq x_2 \leq x_e + s$ );  $u_i$  – длина  $i$ -й части ( $1 \leq i \leq N$ );  $L_{CE}$  – длина отрезка  $CE$ , где  $L_{CE} = [y_2^2 + (x_e + s - x_2)^2]^{1/2}$ .

Найдем число  $N$  и длины всех частей высокого растения после резания его ножами с учетом принятых допущений.

Если  $H - (R + h) < L_{CE}$ , то  $N = 1$  и  $u_1 = H - (R + h) + y_2$ ; иначе:

$$1) u_1 = L_{CE}; k = 2;$$

$$2) u_k = s;$$

3) если  $\sum_{i=1}^k u_i + R + h - y_2 \geq H$ , то  $N = k$  и  $u_N = H - (R + h) + y_2 - \sum_{i=1}^{N-1} u_i$ ; иначе  $k = k + 1$ . Далее следует переход к пункту 2.

Пусть  $l$  – длина верхней части прямого растения;  $M(l)$  – масса верхней части растения длиной  $l$ . Примем, что плотность  $\rho$  растения на единицу длины в данной точке (сечении) увеличивается прямо пропорционально расстоянию  $y$  от вершины растения до точки:

$$\rho = a y, \\ M(l) = a l^2 / 2,$$

где  $a$  – коэффициент пропорциональности.

Тогда массу части растения длиной  $\Delta$ , расположенной на расстоянии  $l$  от вершины растения, можно рассчитать по формуле:

$$m(l, \Delta) = M(l + \Delta) - M(l)$$

или

$$m(l, \Delta) = a[(l + \Delta)^2 - l^2] / 2. \quad (11)$$

Согласно определению,

$$m_L = 100 M_L / M_T, \quad (12)$$



где  $M_T$  – сумма вычисляемых по формуле (11) без коэффициента  $a$  и при заданных параметрах  $l$ ,  $\Delta$  масс всех частиц;  $M_L$  – сумма вычисляемых по формуле (11) без коэффициента  $a$  масс тех частиц, длина  $\Delta$  которых не превышает заданной величины  $L$ .

Согласно определению,

$$m = m_L |_{L=19mm} - m_L |_{L=8mm}. \quad (13)$$

*Алгоритм расчета массовой доли частиц в заданных диапазонах длины*

Пусть  $SubA(l, \Delta, L, M_L, M_T)$  – подпрограмма с входными переменными  $l, \Delta, L$  и выходными переменными  $M_L, M_T$ , выполняющая три шага.

1. Расчет  $m(l, \Delta)$  по формуле (11) без коэффициента  $a$ .

2. Увеличение параметра  $M_T$  на  $m(l, \Delta)$ .

3. Увеличение параметра  $M_L$  на  $m(l, \Delta)$ , если  $l \leq L$ .

Следующий алгоритм был реализован для вычисления величины  $m_L$ .

1. Назначение входных переменных  $R, (H-h), s, d, L, k$ .

2. Расчет величины  $\lambda$  из уравнения (1).

3. Расчет величины  $\theta$  из уравнения (2).

4. Расчет величин  $x_0, x_e$  по формулам (7–8).

5. Назначение переменных  $I, M_L, M_T$ :  $I = 1$ ;  $M_L = 0$ ;  $M_T = 0$ .

6. Назначение величины  $x_1$ :  $x_1 = x_0 + Id$ .

7. Вычисление величин  $\alpha_1$  и  $y_1$  из уравнений (3).

8. Назначение величины  $x_2$ :  $x_2 = x_1$ .

9. Вычисление величин  $\alpha_2$  и  $y_2$  из уравнений (4).

10. Вычисление длины  $u$  частицы из равенства (9) и выполнение подпрограммы  $SubA(l, \Delta, L, M_L, M_T)$  при  $l = H - R - h + y_1, \Delta = u$ .

11. Увеличение переменной  $I$  на 1.

12. Выполнение пунктов 6–11, если  $x_1 \leq x_e$ .

13. Назначение величины  $x_2$ :  $x_2 = x_0 + Id$ .

14. Если  $H - h \leq R$ , то:

1) вычисление длины  $u$  частицы из равенства (10);

2) выполнение подпрограммы  $SubA(l, \Delta, L, M_L, M_T)$  при  $l = 0, \Delta = u$ .

15. Если  $H - h > R$ , то:

1) вычисление длины отрезка  $CE$ :  $L_{CE} = [y_2^2 + (x_e + s - x_2)^2]^{1/2}$ ;

2) если  $H - R - h + y_2 < L_{CE}$ , то:

а)  $u_1 = H - (R + h) + y_2$ ;

б) выполнение подпрограммы  $SubA(l, \Delta, L, M_L, M_T)$  при  $l = 0, \Delta = u_1$ ;

3) если  $H - R - h + y_2 \geq L_{CE}$ , то:

а)  $u_1 = L_{CE}$ ;  $u_{sum} = u_1$ ; выполнение подпрограммы  $SubA(l, \Delta, L, M_L, M_T)$  при  $l = H - R - h + y_2 - u_1, \Delta = u_1$ ;

б) если  $u_{sum} + s + R + h - y_2 \geq H$ , то  $u_1 = H - (R + h) + y_2 - u_{sum}$ ; выполнение подпрограммы  $SubA(l, \Delta, L, M_L, M_T)$  при  $l = 0, \Delta = u_1$ ;

в) если  $u_{sum} + s + R + h - y_2 < H$ , то  $u_1 = s$ ;  $u_{sum} = u_{sum} + s$ ; выполнение подпрограммы  $SubA(l, \Delta, L, M_L, M_T)$  при  $l = H - R - h + y_2 - u_{sum}, \Delta = u_1$  и возвращение к предыдущему шагу 2.

16. Увеличение переменной  $I$  на 1.

17. Выполнение пунктов 13–16, если  $x_2 \leq x_e + s$ .

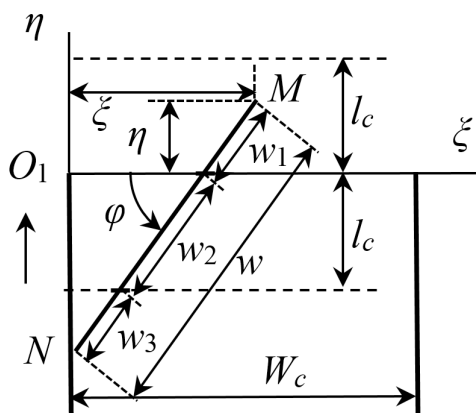
18. Вычисление величины  $m_L$  по формуле (12).

*Математическая модель резания частиц растений в измельчающем аппарате двойного измельчения*

Измельчение растений кормоуборочным комбайном двойного измельчения (с двойным измельчающим аппаратом) включает две стадии: измельчение роторным аппаратом на первой стадии и измельчение с выгрузкой растений дисковым измельчающе-швыряющим аппаратом на второй стадии. На выходе из роторного аппарата частицы захватываются шнеком и подаются в приемное окно дискового аппарата. Будем считать, что в шнеке частицы растений представляют собой прямые отрезки, движущиеся вдоль оси шнека с некоторой известной средней скоростью, позволяющей рассчитать среднюю расчетную длину резки.

Введем неподвижную систему декартовых координат с осью  $O_1\xi$  вдоль прямого лезвия противорезающего бруса и осью  $O_1\eta$  вдоль оси шнека, а также дополнительные переменные:  $w$  – длина частицы в виде отрезка  $MN$  в момент резания ее ножом дискового аппарата, мм;  $m_w$  – масса частицы в виде отрезка  $MN$  в момент резания ее ножом дискового аппарата, кг;  $W_c$  – ширина приемной горловины дискового измельчающе-швыряющего аппарата, мм;  $l_c$  – средняя расчетная длина резки, обеспечиваемая дисковым измельчающе-швыряющим аппаратом, мм.

Пусть в момент перерезания частица  $MN$  располагается в плоскости  $O_1\xi\eta$ , передняя точка  $M$  имеет координаты  $\xi, \eta$ , отрезок  $MN$  образует с осью  $O_1\xi$  угол  $\varphi$  (рис. 5).



Р и с. 5. Частица  $MN$  в приемном окне дискового аппарата в момент резания ножом  
 Fig. 5. A particle  $MN$  at the cutting by a blade of a flywheel cutterhead

Примем, что переменные  $\xi, \eta, \varphi$  – случайные величины с равномерным законом распределения на отрезках  $[0, W_c/2], [0, l_c]$  и  $[\varphi_1, \varphi_2]$  соответственно:

$$\begin{aligned} 0 < \xi &\leq W_c / 2, \\ 0 < \eta &\leq l_c, \\ \varphi_1 &\leq \varphi \leq \varphi_2, \end{aligned} \quad (14)$$

где величины  $\varphi_1, \varphi_2$  зависят от  $\xi$ :

$$\varphi_1 = \begin{cases} 0, & \text{если } w \leq \xi, \\ \arccos(\xi / w), & \text{если } w > \xi, \end{cases} \quad (15)$$

$$\varphi_2 = \begin{cases} \pi, & \text{если } w \leq W_c - \xi, \\ \pi - \arccos[(W_c - \xi) / w], & \text{если } w > W_c - \xi. \end{cases} \quad (16)$$

Число  $n$  частей, сформированных из частицы  $MN$  после всех перерезаний ее ножами дискового аппарата, может быть рассчитано по следующим формулам:

$$n = \begin{cases} 1, & \text{если } w \sin \varphi \leq \eta, \\ \left[ (w \sin \varphi - \eta) / l_c \right] + 2, & \text{если } w \sin \varphi > \eta. \end{cases} \quad (17)$$

Пусть  $w_i$  и  $m_i$  – длина и масса части частицы  $MN$  с номером  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Найдем выражения для длины и массы всех частей частицы, если величины  $w, m_w, \varphi, \eta, l_c$  известны, а массы частей прямо пропорциональны их длинам.

Если  $n = 1$ , частица  $MN$  не перерезается, и ее длина и масса не изменяются:

$$\begin{aligned} w_1 &= w, \\ m_1 &= m_w. \end{aligned} \quad (18)$$

Если  $n = 2$ , частица  $MN$  перерезается один раз, образуя две части. Длины  $w_1, w_2$  и массы  $m_1, m_2$  этих частей можно рассчитать по формулам:

$$\begin{aligned} w_1 &= \eta / \sin \varphi, \\ w_2 &= w - w_1, \\ m_1 &= w_1 m_w / w, \\ m_2 &= w_2 m_w / w. \end{aligned} \quad (19)$$

Если  $n > 2$ , частица  $MN$  перерезается с образованием  $n$  частей. Длины  $w_1, w_2, \dots, w_n$  и массы этих частей можно рассчитать по формулам:

$$\begin{aligned} w_1 &= \eta / \sin \varphi, \\ w_2 = w_3 = \dots = w_{n-1} &= l_c / \sin \varphi, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_n &= w - w_1 \dots - w_{n-1}, \\ m_i &= w_i m_w / w, \\ i &= 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (20)$$

Случайные величины  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\varphi$  можно задавать с любой точностью следующими формулами:

$$\xi = i W_c / (2n_\xi), \quad (21.1)$$

$$\eta = j l_c / n_\eta, \quad (21.2)$$

$$\varphi = \varphi_1 + q(\varphi_2 - \varphi_1) / n_\varphi, \quad (21.3)$$

где  $n_\xi$ ,  $n_\eta$ ,  $n_\varphi$  – заданные натуральные числа;  $i, j, q$  – целые числа:  $i = 1, 2, \dots, n_\xi$ ;  $j = 1, 2, \dots, n_\eta$ ;  $q = 1, 2, \dots, n_\varphi$ .

Так как  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\varphi$  – случайные величины с равномерным законом распределения, то целые числа  $i, j, q$  в равенствах (21) можно также рассматривать как случайные величины в пределах от 1 до  $n_\xi$ , от 1 до  $n_\eta$ , от 1 до  $n_\varphi$  соответственно с вероятностью  $1/n_\xi$ ,  $1/n_\eta$ ,  $1/n_\varphi$  соответственно<sup>14</sup>. Величины  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  в формулах (15–16) зависят от  $i$ . Число комбинаций, в которых целые числа  $i, j, q$  примут все возможные значения, равно произведению  $(n_\xi \cdot n_\eta \cdot n_\varphi)$ .

*Алгоритм вычисления массовой доли частиц в заданных диапазонах длины*

Пусть  $w, m_w$  – входные переменные, обозначающие длину и массу частицы до перерезания ножами дискового аппарата. Представим алгоритм подпрограммы *SubB*( $w, m_w, L, M_L, M_T$ ), предназначенной для изменения величин переменных  $M_L, M_T$ .

1. Назначение переменных  $W_c, w, m_w, l_c, L, M_L, M_T$ .

2. Назначение констант  $n_\xi, n_\eta, n_\varphi$  и переменной  $i$ :  $i = 1$ .

3. Вычисление величины  $\xi$  по формуле (21.1).

4. Вычисление величин  $\varphi_1, \varphi_2$  по формулам (15–16).

5. Назначение переменной  $j$ :  $j = 1$ .

6. Вычисление величины  $\eta$  по формуле (21.2).

7. Назначение переменной  $q$ :  $q = 1$ .

8. Вычисление величины  $\varphi$  по формуле (21.3).

9. Вычисление величины  $n$  по формуле (17).

10. Вычисление величин  $w_1$  и  $m_1$  по формулам (18), если  $n = 1$ , или величин  $w_1, w_2$  и  $m_1, m_2$  по формулам (19), если  $n = 2$ , или величин  $w_1, w_2, \dots, w_n$  и  $m_1, m_2, \dots, m_n$  по формулам (20), если  $n > 2$ .

11. Увеличение параметра  $M_T$  на  $m_1$ , если  $n = 1$ , или на  $m_1$  и  $m_2$ , если  $n = 2$ , или на  $m_1, m_2, \dots, m_n$ , если  $n > 2$ .

12. Увеличение параметра  $M_L$  на  $m_1$ , если  $w_1 \leq L$ ; увеличение параметра  $M_L$  на  $m_2$ , если  $w_2 \leq L$ ; увеличение параметра  $M_L$  на  $m_n$ , если  $w_n \leq L$ .

13. Увеличение переменной  $q$  на 1.

14. Выполнение шагов 8–13, если  $\varphi < \varphi_2$ .

15. Увеличение переменной  $j$  на 1.

16. Выполнение шагов 6–15, если  $\eta < l_c$ .

17. Увеличение переменной  $i$  на 1.

18. Выполнение шагов 3–17, если  $\xi \leq W_c / 2$ .

*Алгоритм расчета величины  $t_L$  для двойного измельчающего аппарата* совпадает с алгоритмом расчета  $t_L$  для роторного измельчающе-швыряющего аппарата, где в пунктах 10, 14 и 15 внесены следующие изменения.

10. Вычисление длины  $u$  частицы из равенства (9); вычисление массы  $m_w$  частицы по формуле (11) при  $a = 1$ ,  $l = H - R - h + y_1$ ,  $\Delta = u$ , выполнение подпрограммы *SubB*( $w, m_w, L, M_L, M_T$ ) при  $w = u$ .

В пункте 14:

2) Вычисление массы  $m_w$  частицы по формуле (11) при  $a = 1$ ,  $l = 0$ ,  $\Delta = u$ , выполнение подпрограммы *SubB*( $w, m_w, L, M_L, M_T$ ) при  $w = u$ .

В пункте 15:

2) б) Вычисление массы  $m_w$  частицы по формуле (11) при  $a = 1$ ,  $l = 0$ ,  $\Delta = u_1$ , выполнение подпрограммы *SubB*( $w, m_w, L, M_L, M_T$ ) при  $w = u_1$ .

<sup>14</sup> Polyaniin A. D., Manzhirov A. V. Handbook of mathematics for engineers and scientists. Taylor & Francis Group, LLC, 2007. 1509 p. URL: <https://isidore.co/calibre/get/pdf/6338>

3) Если  $H - R - h + y_2 \geq L_{CE}$ , то:

а)  $u_1 = L_{CE}$ ;  $u_{sum} = u_1$ ; вычисление массы  $m_w$  частицы по формуле (11) при  $a = 1$ ,  $l = H - R - h + y_2 - u_1$ ,  $\Delta = u_1$ , выполнение подпрограммы  $SubB(w, m_w, L, M_L, M_T)$  при  $w = u_1$ ;

б) если  $u_{sum} + s + R + h - y_2 \geq H$ , то  $u_1 = H - (R + h) + y_2 - u_{sum}$ , вычисление массы  $m_w$  частицы по формуле (11) при  $a = 1$ ,  $l = 0$ ,  $\Delta = u_1$ , выполнение подпрограммы  $SubB(w, m_w, L, M_L, M_T)$  при  $w = u_1$ ;

в) если  $u_{sum} + s + R + h - y_2 < H$ , то  $u_1 = s$ ;  $u_{sum} = u_{sum} + s$ ; вычисление массы  $m_w$  частицы по формуле (11) при  $a = 1$ ,  $l = H - R - h + y_2 - u_{sum}$ ,  $\Delta = u_1$ , выполнение подпрограммы  $SubB(w, m_w, L, M_L, M_T)$  при  $w = u_1$  и возвращение к предыдущему шагу 2.

*Расчет массовой доли частиц в заданных диапазонах длины*

Алгоритм расчета массовой доли частиц растений в заданных диапазонах длины был реализован в среде программирования Lazarus. Исходные данные назначаемых переменных и констант приведены в табл. 2.

Расчеты показали, что распределение по длине массовой доли  $m_L$  частиц растений, измельченных роторным аппаратом, имеет три участка, на которых функция распределения может быть аппроксимирована линейными зависимостями от аргумента  $L$  (рис. 6, а). На первом участке аргумент изменяется в диапазоне от нуля до величины, не превышающей подачи  $s$  на нож, на втором – равен подаче  $s$  с незначительным варьированием нижней и верхней границы диапазона, на третьем – в диапазоне от величины подачи до максимальной длины частиц. Испытания

роторного кормоуборочного комбайна типа КИР-1,5 на кошени с измельчением люцерны высотой 440 мм<sup>15</sup> показали, что, несмотря на значительный диапазон, экспериментальные значения массовой доли частиц длиной до 50 мм и свыше 100 мм практически точно соответствуют теоретически найденным значениям, показанным на графике 1 функции распределения (рис. 6, а). Максимальное согласование между экспериментальными и расчетными данными массовой доли частиц длиной свыше 100 мм наблюдается при кошени с измельчением вики с овсом<sup>16</sup> высотой 780 мм (график 3) и эспарцета<sup>17</sup> высотой 1 200 мм (график 4).

Двойной измельчающий аппарат повышает качество измельчения в том случае, если частота вращения шнека и/или дискового или цилиндрического аппарата обеспечивают среднюю расчетную длину резки, не превышающую величины подачи роторного аппарата (рис. 6, б). При этом массовая доля частиц, длина которых превышает 100 мм, снижается практически до нуля, а наибольшая доля частиц находится в диапазоне увеличенной и уменьшенной на 5 мм расчетной длины резки, изменяясь от 45 % при расчетной длине резки 25 мм до 75 % при расчетной длине резки 5 мм. Таким образом, невозможность регулирования угловой скорости шнека и/или дискового барабана не позволяет использовать двойной измельчающий аппарат на заготовке кормов с различными требованиями к качеству измельчения.

Расчеты показали, что роторные кормоуборочные комбайны не позволяют обеспечить качество измельчения

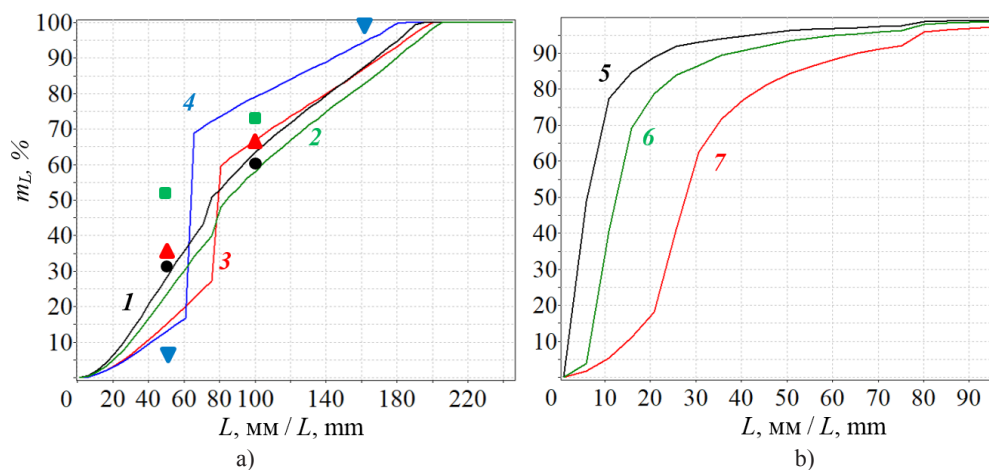
<sup>15</sup> Косилка-измельчитель роторная КИР-1,5М. Протокол испытаний № 11-11-13 (2130042). ФГБУ «Северо-Кавказская МИС». Зеленоград. 2013. 6 с.; Косилка-измельчитель роторная КИР-1,85 «Корммаш». Отчет № 11-25-14 (1130122) базовых испытаний. ФГБУ «Северо-Кавказская МИС». Зеленоград. 2014. 12 с.

<sup>16</sup> Косилка-измельчитель роторная КИР-1,5М. Протокол испытаний. ФГБУ «Подольская государственная зональная МИС». 2015. URL: <http://www.podolskkmis.ru/2013-12-20-07-09-44/2013-12-27-06-33-09/53-kratkie-protokoly-ispytaniy-za-2015-god/250-09-13-15-5130062>

<sup>17</sup> Косилка-измельчитель роторная КИР-1,5Е. Протокол испытаний № 14-42-2001 (4130232). ГУ «Центрально-Черноземная МИС». 2001. 4 с.

Исходные данные  
Initial data

Параметр / Parameter	Значение / Value
$R$ , мм / $R$ , mm	285
$R \omega \cdot 10^{-3}$ , м/с / $R \omega \cdot 10^{-3}$ , m/s	40
$d$ , мм / $d$ , mm	0,5
$k$	1
$W_c$ , мм / $W_c$ , mm	246
$n_\omega, n_p, n_\phi$	30



Р и с. 6. Графики зависимости от  $L$  массовой доли  $m_L$  частиц растений, длина которых не превышает  $L$ , после измельчения роторным кормоуборочным комбайном (а) и комбайном двойного измельчения (б): 1 –  $H-h = 367$  мм,  $s = 71$  мм; ● – экспериментальные данные измельчения люцерны; 2 –  $H-h = 377$  мм,  $s = 80$  мм; ■ – экспериментальные данные измельчения люцерны; 3 –  $H-h = 660$  мм,  $s = 76$  мм; ▲ – экспериментальные данные измельчения вики с овсом; 4 –  $H-h = 1001$  мм,  $s = 63$  мм; ▼ – экспериментальные данные измельчения эспарцета; 5 –  $H-h = 660$  мм,  $s = 76$  мм,  $l_c = 5$  мм; 6 –  $H-h = 660$  мм,  $s = 76$  мм,  $l_c = 10$  мм; 7 –  $H-h = 660$  мм,  $s = 76$  мм,  $l_c = 25$  мм

Fig. 6. The effect of  $L$  on mass fraction  $m_L$  of plant particles, the length of which does not exceed  $L$ , after chopping by a rotary forage harvester (a) and a double chop forage harvester (b): 1 –  $(H-h) = 367$  mm,  $s = 71$  mm; ● – experimental data for alfalfa; 2 –  $(H-h) = 377$  mm,  $s = 80$  mm; ■ – experimental data for alfalfa; 3 –  $(H-h) = 660$  mm,  $s = 76$  mm; ▲ – experimental data for alfalfa with oats; 4 –  $(H-h) = 1001$  mm,  $s = 63$  mm; ▼ – experimental data for sainfoin; 5 –  $(H-h) = 660$  mm,  $s = 76$  mm,  $l_c = 5$  mm; 6 –  $(H-h) = 660$  mm,  $s = 76$  mm,  $l_c = 10$  mm; 7 –  $(H-h) = 660$  mm,  $s = 76$  mm,  $l_c = 25$  mm

трав на сенаж, при котором массовая доля частиц длиной 8–18 мм находится в диапазоне 45–75 % (рис. 7, а). При подаче более 20 мм или при скорости комбайна более 1,6 м/с роторные комбайны обеспечивают массовую долю

таких частиц не более 35 %. Кормоуборочные комбайны с двойным измельчающим аппаратом позволяют обеспечить заготовку трав на сенаж только при заданной и регулируемой частоте вращения барабана (дисково-



го или цилиндрического) либо шнека, подающего растения в камеру дискового или цилиндрического аппарата.

### Обсуждение и заключение

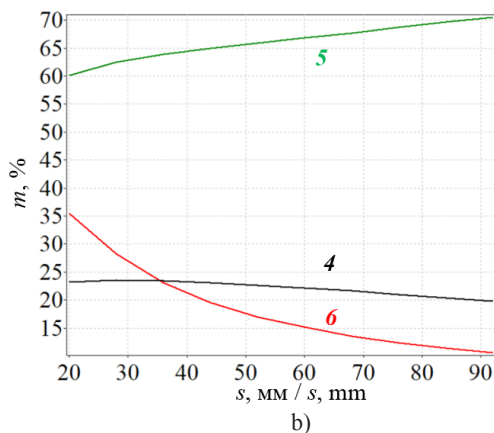
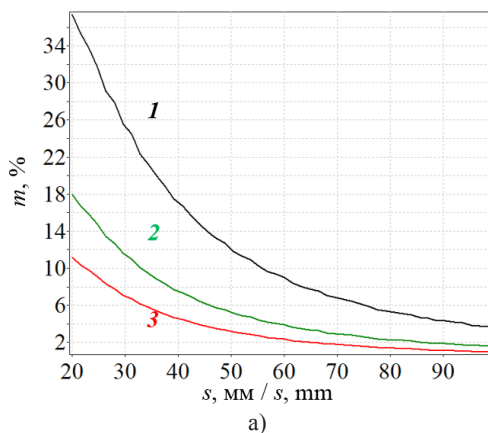
1. Кормоуборочные комбайны с роторным измельчающе-швыряющим аппаратом, осуществляющим одновременно три операции (кошение растений на корню, измельчение растений, выгрузку их в транспортное средство), отличаются простотой конструкции и не позволяют обеспечить заготовку трав на сенаж с массовой долей частиц длиной 8–19 мм в пределах 45–75 %.

2. Разработанная математическая модель измельчения растений роторным измельчающе-швыряющим аппаратом позволяет оценить массовую долю частиц измельченных растений в любом диапазоне их длины в зависимости от высоты растений, высоты среза, подачи. В рамках данной модели в пределах высоты растений 400–1 200 мм и подачи 20–100 мм функция распределения массовой доли частиц по длине представляет собой три участка, на которых линии графика функции близки к прямым. С увеличением высоты растений

возрастает массовая доля частиц, длина которых примерно равна подаче.

3. Кормоуборочные комбайны с двойным измельчающим аппаратом позволяют обеспечить заготовку трав на сенаж с массовой долей частиц длиной 8–19 мм в пределах 45–75 % только при регулировании и соответствующей настройке угловой скорости шнека и/или дискового или цилиндрического барабана.

4. Разработанная математическая модель измельчения растений двойным измельчающим аппаратом позволяет оценить массовую долю частиц измельченных растений в любом диапазоне их длины в зависимости от высоты растений, высоты среза, подачи на нож, средней расчетной длины резки. Закон распределения массовой доли частиц измельченных растений зависит от средней расчетной длины резки. В пределах диапазона длины частиц, границы которого отличаются от расчетной длины резки на 5 мм, содержится 45–75 % частиц. Массовая доля частиц длиной 8–19 мм практически не зависит от подачи и высоты растений при расчетной длине резки менее 10 мм.



Р и с. 7. Влияние подачи  $s$  на массовую долю частиц  $m$  длиной 8–19 мм при измельчении растений роторным кормоуборочным комбайном (а) и кормоуборочным комбайном двойного измельчения (б): 1 –  $(H-h) = 250$  мм; 2 –  $(H-h) = 600$  мм; 3 –  $(H-h) = 1\,000$  мм; 4 –  $(H-h) = 660$  мм,  $l_c = 5$  мм; 5 –  $(H-h) = 660$  мм,  $l_c = 10$  мм; 6 –  $(H-h) = 660$  мм,  $l_c = 25$  мм

Fig. 7. The effect of  $s$  on mass fraction of plant particles  $m$  with lengths from 8 mm to 19 mm for a rotary forage harvester (a) and a double chop forage harvester (b): 1 –  $(H-h) = 250$  mm; 2 –  $(H-h) = 600$  mm; 3 –  $(H-h) = 1\,000$  mm; 4 –  $(H-h) = 660$  mm,  $l_c = 5$  mm; 5 –  $(H-h) = 660$  mm,  $l_c = 10$  mm; 6 –  $(H-h) = 660$  mm,  $l_c = 25$  mm



**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Crop processing and chop length of corn silage: effects on intake, digestion, and milk production by dairy cows / M. A. Bal [et al.] // Journal of Dairy Science. 2000. Vol. 83, issue 6. P. 1264–1273. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)74993-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74993-9)
2. Effects of the chop lengths of alfalfa silage and oat silage on feed intake, milk production, feeding behavior, and rumen fermentation of dairy cows / S. K. Bhandary [et al.] // Journal of Dairy Science. 2008. Vol. 91, issue 5. P. 1942–1958. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0358>
3. Effect of grass silage chop length when fed alone, or with corn silage, on digestion and metabolism in dairy cows / U. Tayyab [et al.] // Journal of Animal Science. 2018. Vol. 96, issue 3. P. 394. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/sky404.864>
4. **Addah W., Baah J., McAllister T. A.** Effect of silage chop length on feed intake and feeding behaviour of finishing feedlot steers // Acta Agriculturae Scandinavica, Section A – Animal Science. 2016. Vol. 66, no. 2. P. 106–114. DOI: <https://doi.org/10.1080/09064702.2016.1267789>.
5. **Saqib G. S., Finner M. F.** Simulated ideal length of cut for forage harvesters // Transactions of the ASAE. 1982. Vol. 25, issue 5. P. 1237–1238. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.33704>
6. **Morgan D. D. V., Osman M. M.** A mathematical model of an apparatus for the assessment of the length distribution of chopped forage // Journal of Agricultural Engineering Research. 1984. Vol. 30. P. 157–164. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(84\)80017-7](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(84)80017-7)
7. **O'Dogherty M. J.** Chop length distributions from forage harvesters and a simulation model of chopping // Journal of Agricultural Engineering Research. 1984. Vol. 30. P. 165–173. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(84\)80018-9](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(84)80018-9)
8. **Szendro P.** Examination of chopping process in self-propelled forage harvesters // Acta Agromonica Hungarica. 1979. Vol. 28, issues 1-2. P. 106–119.
9. **Yukueda M., Kawamura N.** Studies of a direct-throw flail-type forage harvester (I). Journal of the Japanese society of agricultural machinery. 1976. Vol. 37, issue 4. P. 600–605. DOI: <https://doi.org/10.11357/jsam1937.37.600>
10. **Howe S. D., Bishop T.** Forage harvesters: designs for the 80s // Power Farming. 1982. Vol. 64, issue 4. P. 36–45.
11. **Белов М. И., Чепурной А. И.** Перспективные измельчающие аппараты кормоуборочных комбайнов // Тракторы и сельхозмашины. 1985. № 5. С. 39–41.
12. **Белов М. И., Чепурной А. И.** Анализ схем кормоуборочных машин // Тракторы и сельхозмашины. 1986. № 6. С. 26–28.
13. **Ерохин М. Н., Белов М. И., Судник Ю. А.** Модель и экспериментальное исследование ротационного режущего аппарата // Тракторы и сельхозмашины. 2003. № 12. С. 21–24.

*Поступила 08.12.2018; принята к публикации 11.02.2019; опубликована онлайн 28.06.2019*

*Об авторе:*

**Белов Михаил Иванович**, профессор, кафедра сопротивления материалов и деталей машин, Институт механики и энергетики, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49), доктор технических наук, профессор, ResearchID: T-5622-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9907-8825>, B-Mikhael@yandex.ru

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Bal M.A., Shaver R.D., Jirovec A.G., Shinnors K.J., Coors J.G. Crop processing and chop length of corn silage: Effects on intake, digestion, and milk production by dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2000; 83(6):1264-1273. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)74993-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74993-9)
2. Bhandary S.K., Ominsky K.M., Wittenberg K.M., Plaizier J.C. Effects of the chop lengths of alfalfa silage and oat silage on feed intake, milk production, feeding behavior, and rumen fermentation of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2008; 91(5):1942-1958. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0358>
3. Tayyab U., Wilkinson R., Reynolds C., Sinclair L. Effect of grass silage chop length when fed alone, or with corn silage, on digestion and metabolism in dairy cows. *Journal of Animal Science*. 2018; 96(3):394. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/sky404.864>
4. Addah W., Baah J., McAllister T.A. Effect of silage chop length on feed intake and feeding behaviour of finishing feedlot steers. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A – Animal Science*. 2016; 66(2):106-114. DOI: <https://doi.org/10.1080/09064702.2016.1267789>
5. Saqib G.S., Finner M.F. Simulated ideal length of cut for forage harvesters. *Transactions of the ASAE*. 1982; 25(5):1237-1238. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.33704>
6. Morgan D.D.V., Osman M.M. A mathematical model of an apparatus for the assessment of the length distribution of chopped forage. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1984; 30:157-164. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(84\)80017-7](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(84)80017-7)
7. O'Dogherty M.J. Chop length distributions from forage harvesters and a simulation model of chopping. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1984; 30:165-173. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(84\)80018-9](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(84)80018-9)
8. Szendro P. Examination of chopping process in selfpropelled forage harvesters. *Acta Agronomy Academy Scientific Hungaria*. 1979; 28(1-2):106-119.
9. Yukueda M., Kawamura N. Studies of a direct-throw flail-type forage harvester (I). *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*. 1976; 37(4):600-605. DOI: <https://doi.org/10.11357/jsam1937.37.600>
10. Howe S.D., Bishop T. Forage harvesters: Designs for the '80s. *Power Farming*. 1982; 64(4):36-45.
11. Belov M.I., Chepurnoy A.I. [Perspective chopper units of forage harvesters]. *Traktory i selkhoz-mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1985; 5:39-41. (In Russ.)
12. Belov M. I., Chepurnoy A. I. [Analysis of forage harvester schemes]. *Traktory i selkhoz-mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 1986; 6:26-28. (In Russ.)
13. Yerokhin M. N., Belov M. I., Sudnik Yu. A. [Model and experimental study of rotary mower]. *Traktory i selkhoz-mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2003; 12:21-24. (In Russ.)

*Received 08.12.2018; revised 11.02.2019; published online 28.06.2019*

*About author:*

**Mikhail I. Belov**, Professor, Chair of Strength of Materials and Machine Parts, Institute of Mechanics and Energetics, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: T-5622-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9907-8825>, B-Mikhael@yandex.ru

*The author has read and approved the final version of the paper.*