

УДК 621.926.3

**Р.Р. ИСКЕНДЕРОВ, В.В. ОЧИНСКИЙ, А.Т. ЛЕБЕДЕВ, Р.В. ПАВЛЮК**

Ставропольский государственный аграрный университет

## **МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ПРИНЦИПА РАБОТЫ РОТОРНОЙ ДРОБИЛКИ**

*Измельчение как разновидность ключевого процесса разделения материалов на части применяется в сельском хозяйстве, являясь самым распространенным и незаменимым в механической технологии приготовления кормов. Это обуславливается требованиями физиологии кормления животных. В результате измельчения кормов образуется множество частиц с высокоразвитой поверхностью, что способствует ускорению процессов пищеварения и повышает усвояемость питательных веществ.*

*Для измельчения используют мельницы и дробилки. Такие машины должны выдавать продукт заданной крупности, но зачастую этого не происходит, и до 40...60% готового продукта не соответствует установленным требованиям. Поэтому задачей современного измельчения является минимизация или полное отсутствие переизмельченных и недоизмельченных фракций, т.е. более рациональное использование энергии, затрачиваемой на процесс разрушения материалов.*

*В статье представлен принцип воздействия на материал в роторной дробилке на примере зерновки пшеницы. Проведен анализ в идеализированной конструкции: один паз и один зуб. Срез определен как способ измельчения, применяемый в конструкциях данного типа. Предложены и обоснованы теоретически некоторые конструктивные особенности при измельчении пшеницы, которые помогут добиться наилучших результатов в современных измельчителях зерновых материалов.*

*Ключевые слова: измельчение, заданная крупность, ротор, статор, модель зерновки.*

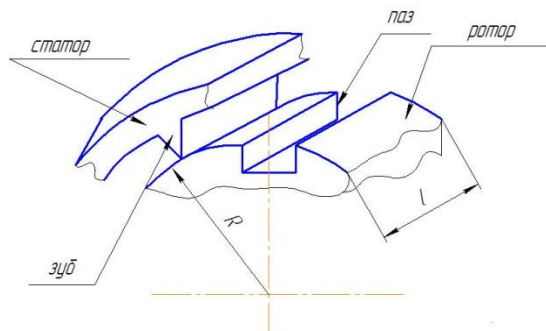
Практически любой технологический процесс сопровождается отделением частей или делением на части исходного материала. Различны лишь машины, которые выполняют данные операции, формы их рабочих органов и способы разделения [1], используемые для этого. Измельчение, резание материала и другие процессы составляют основу и являются разновидностями технологического процесса разделения материала на части, главной определяющей задачей которого является разделение исходного материала на заданное количество частей [2].

Измельчение как разновидность данного ключевого процесса применяется в сельском хозяйстве, являясь самым распространенным и незаменимым в механической технологии приготовления кормов. Это обуславливается требованиями физиологии кормления животных. В результате измельчения кормов образуется множество частиц с высокоразвитой поверхностью, что способствует ускорению процессов пищеварения и повышает усвояемость питательных веществ [3].

Для измельчения используют мельницы и дробилки. Такие машины должны выдавать продукт заданной крупности, но зачастую этого не происходит, и до 40...60% готового продукта не соответствует установленным требованиям. Поэтому задачей современного измельчения является минимизация или полное отсутствие переизмельченных и недоизмельченных фракций, т.е. более рациональное использование энергии затрачиваемой на процесс разрушения материалов. Для решения этих задач необходимо проводить теоретический анализ работы используемых дробилок, опираясь на их конструктивные особенности и учитывая

особенности измельчаемого в них материала. Проведем анализ принципа воздействия на материал в роторной дробилке на примере зерновки пшеницы.

Такая дробилка [4] состоит из двух основных элементов: неподвижного статора, снабжённого продольными заострёнными выступами – зубьями, и вращающегося ротора с регулярно размещёнными на его поверхности продольными пазами (рис. 1).



**Рис. 1. Ротор и статор роторной дробилки**

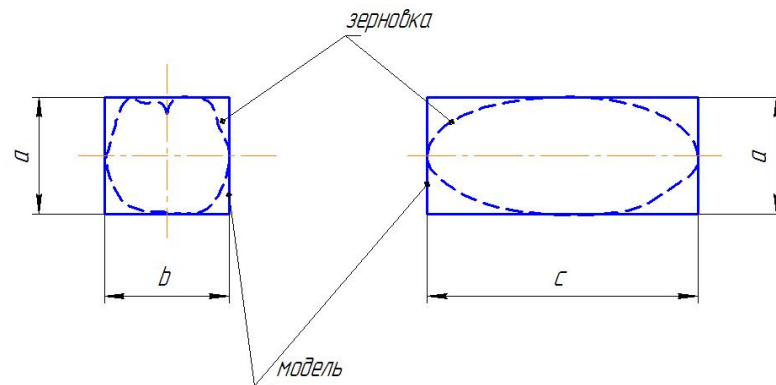
Нами была изготовлена и опробована подобная роторная дробилка для измельчения зерна пшеницы с техническими характеристиками: диаметр ротора –  $D = 90$  мм, длина ротора –  $L = 60$  мм, число пазов ротора –  $N = 28$ , число зубьев на статоре – 2; привод осуществлялся от электродвигателя мощностью 1 кВт с числом оборотов  $n = 1500$  об/мин.

Практика показала, что зерно, поступающее в рабочую зону дробилки при вращении ротора, быстро разрушается и превращается в дроблёнку. При этом готовый продукт представляет собой смесь двух качественно различных состояний: фракции дроблёнки различной степени крупности и так называемые мучные фракции. Визуальный анализ формы и сечений частиц полученной дроблёнки показал, что практически все поверхности разрушения оказались гладкими, без следов разлома. Это позволило считать решающим в процессе измельчения исходного зерна фактор среза, когда находящееся в пазах ротора вращающееся зерно срезается выступающими зубьями статора. Мучные фракции при этом могут образовываться по разным причинам, в том числе и за счёт тонких слоёв среза исходного продукта, и за счёт разного рода истираний, происходящих как при поступлении исходного материала из дробильной камеры к зубу статора, так и в процессе принудительного перемещения уже размельчённого продукта к разгрузочному окну.

Процесс работы по разрушению сырья, например, зернового продукта, роторной дробилкой представляется следующим образом. Зерно из приёмного бункера наполняет дробильную камеру и попадает в продольные пазы ротора, который транспортирует его к зубьям статора, производящим разрушение его естественной формы. Полученный таким образом конечный продукт перемещается далее в пазах ротора к разгрузочному окну.

Механизм дробления сырья роторной дробилкой, судя по результатам на выходе – это сложный процесс с практически непрогнозируемыми результатами как по гранулометрическому составу дроблёнки, так и по количеству муки, являющейся отходом в кормопроизводстве [3]. Для того, чтобы получить прогнозируемую производительность подобных дробилок с заданным интервалом крупности дроблёнки и минимизировать количество мучных отходов, необходимо исследовать работу такой дробилки как теоретически, так и экспериментально, выяснить причинно-следственные связи параметров её элементов и их влияние на результат.

Поскольку в характеристике зерновки фиксируются три размера, определим геометрию модели зерновки в форме прямоугольного параллелепипеда с шириной  $a$ , высотой  $b$  и длиной  $c$  (рис. 2).



**Рис. 2. Модель зерновки пшеницы**

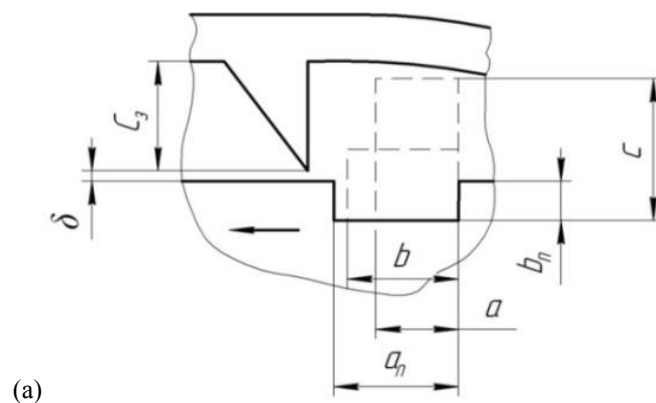
Для чистоты последующих рассуждений пока будем считать, что ротор снабжён одним единственным продольным пазом, в поперечном сечении которого размещена только одна зерновка, точнее её модель, а на внутренней поверхности статора размещён один зуб, разрушающий зерновку (модель) при движении ротора.

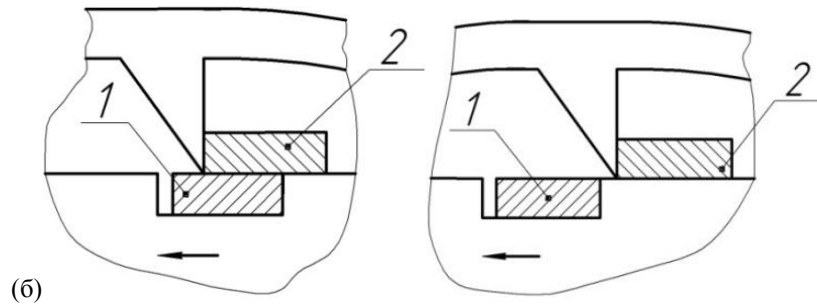
Определимся с размерами паза, зуба и их взаимным расположением в радиальном направлении, исходя из того, что разрушение зерновки происходит путём среза. Очевидно, для реализации среза модель, как и сама зерновка, должна размещаться в продольном пазу ротора и выступать за габаритные (радиальные) размеры ротора так, чтобы взаимодействие с зубом дробилки происходило её выступающей частью.

Упорядочим значения геометрических размеров модели зерновки так, чтобы выполнялись неравенства

$$a \leq b \leq c.$$

Будем считать, что в поперечном сечении паза может размещаться только один элемент – модель зерна. При таких ограничениях существует всего четыре разумных варианта регулярного размещения модели зерна вдоль паза: по два в горизонтальном и вертикальном положении так, как это показано на рисунке 3(a).





**Рис. 3. Варианты размещения модели зерновки в пазу ротора (а) и процесс разрушения модели зерновки срезом (б)**

Исходя из принятых размеров модели, назначим предварительно границы поперечных размеров паза  $a_n$  и  $b_n$  и радиальный (основной) размер зуба  $c_3$ :

$$a + b > a_n > b;$$

$$a/2 \geq b_n > 0;$$

$$c_3 = c + \delta,$$

где  $\delta$  – зазор, определяемый из технологических и конструктивных соображений, – возможно, величина регулируемая, переменная.

На рисунке 3(б) схематично представлен процесс работы по срезу модели зерновки в квазистатическом режиме при вращении ротора относительно статора против часовой стрелки.

Очевидно, что процесс деления модели зерновки на части путём среза протекает независимо от её положения, равно как и факт того, что только оставшаяся в пазу часть 1 перемещается далее и выносится из дробилки. Столь же очевидно, что другая часть 2 должна ожидать полного оборота ротора для того, чтобы снова попасть в паз и быть или не быть срезанной ещё раз.

Существует несколько теорий измельчения, анализирующих разрушение модели материала [5]: например, исследования Риттингера говорят о модели кубической формы с ребром  $D$ , которая разрушается любым способом до кубов с ребром  $d$ . А число полученных кубиков, очевидно, пропорционально кубу степени измельчения, т.е.  $\lambda^3 = D^3 / d^3$ .

В действительности же с учетом характера, величины и направления сил, под действием которых материал разрушается, а также количественных результатов разрушения процесс измельчения является в высшей степени сложным, и стремление описать его каким-либо обобщенным уравнением едва ли может привести к исчерпывающему ответу на основной вопрос теории измельчения [5]. Необходим индивидуальный подход, который бы учитывал тип измельчителя и материал, подвергающийся в нем разрушению.

Нет сомнений в том, что параметры дробилки связаны с типом перерабатываемого материала. Так для пшеницы, необходимые физико-механические характеристики [6] при влажности 13...14%:

– размеры: длина 4,0...8,6 мм; ширина 1,6...4,0 мм; толщина 1,5...3,8 мм;

– плотность:  $\gamma = 1,2...1,5$  г/см<sup>3</sup>;

– абсолютная масса (масса 1000 шт. семян): 22...42 г;

– критическая скорость: 8,5...1,5 м/с.

Разрушающее усилие соответственно на сжатие, скалывание и срез:

$$R_{сж} = 1069 \text{ Н/см}^2; R_{ск} = 814 \text{ Н/см}^2; R_{ср} = 706 \text{ Н/см}^2.$$

Отталкиваясь от фактических значений, примем следующие усреднённые физико-механические параметры для нашей модели зерновки:

- геометрические размеры:  $a = 2,5$  мм;  $b = 3,0$  мм;  $c = 6,5$  мм;
- объём:  $48,8 \text{ мм}^3 = 48,8 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$ ;
- средняя плотность:  $\gamma = 1,3 \text{ г/см}^3$ ;
- масса модели по средней плотности:  $m = 63,0 \cdot 10^{-3} \text{ г}$ ;
- абсолютная масса:  $m = 42 \cdot 10^{-3} \text{ г}$ ;
- значение разрушающих усилий при срезе:  $R_{\text{ср}} = 706 \text{ Н/см}^2$ .

В нашей геометрической модели соотношение между наименьшим и наибольшим размерами зерна оказывается больше двух:  $c/a = 6,5/2,5 = 2,6$ . Следовательно, при наихудшем (вертикальном) размещении модели зерна (и самого зерна) в пазу и при  $\delta = 0$  одного полного оборота ротора будет недостаточно, при втором обороте произойдёт ещё один срез с остатком на поверхности ротора. Понадобится и третий оборот ротора, чтобы удалить и этот остаток.

Отсюда следует вывод о зависимости производительности дробилки от количества пазов на роторе и количества срезов, необходимых для полного разрушения зерна. При небольших превышениях над поперечным габаритом ротора при дроблении зёрен после первого или второго оборотов тоже могут образовываться мучные фракции. Регулирование зазора  $\delta$  и назначение глубины паза  $b_n$  как раз и призваны минимизировать подобное нежелательное явление, причём назначения размеров этих характеристик должны исходить из результатов статистического анализа размеров разрушаемого материала при пробных дроблениях.

Данный методологический подход к обоснованию принципа работы роторной дробилки в сочетании с экспериментальным помогает более точно и эффективно проводить как конструкторскую работу, так и применять его к разделению сельскохозяйственных культур – таких, как кукуруза, ячмень, горох и др., располагая данными по их геометрическим параметрам и физико-механическим свойствам.

#### **Библиографический список**

1. Лебедев А.Т. Анализ способов измельчения материалов / А.Т. Лебедев, Р.Р. Искендеров // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК: Сборник научных статей. Ставрополь: АГРУС, 2013. С. 221–224.
2. Лебедев А.Т. Ресурсосберегающие направления повышения надежности и эффективности технологических процессов в АПК: Монография. Ставрополь, 2012. 376 с.
3. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. Л.: Колос, Ленинградское отделение, 1978. 560 с.
4. Барабашкин В.П. Молотковые и роторные дробилки (конструкция, расчет, монтаж и эксплуатация). М.: Стройиздат, 1963. 132 с.
5. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. М.: «Химия», 1977. 368 с.
6. Физико-механические свойства семян <http://www.zernosushilki.com/info/obrabotka-zerna/fizikomehanicheskie-svoystva-semyan.html> / Зерносушилки-URL: <http://www.zernosushilki.com> // (дата обращения: 6.10.2014).

**Искендеров Рамиль Рашидович** – инженер, аспирант кафедры «Технический сервис стандартизация и метрология» Ставропольского государственного аграрного университета; 355017, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12; тел.: 8-918-762-34-67; e-mail: iskenderov\_ramil@inbox.ru.

**Очинский Виктор Всеволодович** – д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры «Технический сервис стандартизация и метрология» Ставропольского государственного аграрного университета; 355017, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12; тел.: 8-905-461-99-92.

**Лебедев Анатолий Тимофеевич** – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технический сервис стандартизация и метрология» Ставропольского государственного аграрного университета; 355017, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12; тел.: 8-961-498-64-23; e-mail: lebedev.1962@mail.ru.

**Павлюк Роман Владимирович** – к.т.н., ст. преподаватель кафедры «Технический сервис стандартизация и метрология» Ставропольского государственного аграрного университета; 355017, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12; тел.: 8-918-757-94-56; e-mail: roman\_pavlyuk\_v@mail.ru.

Статья поступила 14.04.2015

## METHODOLOGICAL APPROACH TO THE JUSTIFICATION OF THE IMPACTOR WORK PRINCIPLE

**R.R. ISKENDEROV, V.V. OCHINSKY, A.T. LEBEDEV, R.V. PAVLYUK**

Stavropol State Agrarian University

*Grinding, as a kind of key separation process of materials used in agriculture, is the most common and indispensable in mechanical technology of feed preparation. This is due to the requirements of the physiology of animal feeding. Feed grinding results in a plurality of particles characterized by large surface area which leads to accelerated digestion processes and increased nutrient availability.*

*Mills and crushers are used for grinding. Such machines must produce a given product size, but often this does not happen, and up to 40...60% of the finished product does not meet the requirements. Therefore, the task of modern grinding is to minimize the quantity of overgrinded and undergrinded fractions, which is the rational use of energy expended on the process of materials destruction.*

*This article presents the principle of material transformation in the rotary crusher; the wheat weevil was taken as an example. The analysis was conducted in an idealized structure – one slot and one tooth. Cutting is defined as a method of grinding used in constructions of this type. Some design features for the milling process were proposed and theoretically justified, which will help to achieve the best results in modern shredders of grain material.*

*Key words: grinding, given size, rotor, stator, model caryopsis.*

### References

1. Lebedev A.T. Analysis of the methods of grinding of materials / A.T. Lebedev, R.R. Iskenderov // Actual problems of scientific-technical progress in agriculture: collection of scientific articles. Stavropol: AGRUS. 2013. P. 221–224.
2. Lebedev A.T. Resource-efficient ways of increasing the reliability and efficiency of technological processes in agro-industrial complex: a Monograph. Stavropol. 2012. 376 p.
3. Melnikov S.V. Mechanization and automation of livestock farms. Leningrad: Kolos, Leningrad branch. 1978. 560 p.
4. Baraboshkin V.P. Hammer and impactor (design, calculation, installation and operation). Moscow: Stroyizdat. 1963. 132 p.
5. Sidenko P.M. Grinding in the chemical industry. M.: «Chemistry». 1977. 368 p.

6. Physical and mechanical properties of seeds <http://www.zernosushilki.com/info/obrabotka-zerna/fizikomehanicheskie-svoystva-semyan.html> / Dryer. URL: <http://www.zernosushilki.com> // (reference date: 6.10.2014).

***Iskenderov Ramil Rashidovich*** – engineer, PhD-student of the Department of Technical Service, Standardization and Metrology, Stavropol State Agrarian University; 355017, Stavropol, Zootehnicheskiy per., 12; tel.: 8-918-762-34-67; e-mail: iskenderov\_ramil@inbox.ru.

***Ochinskiy Victor Vsevolodovich*** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Technical Service, Standardization and Metrology, Stavropol State Agrarian University; 355017, Stavropol, Zootehnicheskiy per., 12; tel.:8-905-461-99-92.

***Lebedev Anatoliy Timofeevich*** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Service, Standardization and Metrology, Stavropol State Agrarian University; 355017, Stavropol, Zootehnicheskiy per., 12; tel.: 8-961-498-64-23; e-mail: lebedev.1962@mail.ru.

***Pavlyuk Roman Vladimirovich*** – PhD in Engineering Sciences, senior lecturer in Engineering Sciences, the Department of Technical Service, Standardization and Metrology, Stavropol State Agrarian University; 355017, Stavropol, Zootehnicheskiy per., 12; tel.: 8-918-757-94-56; e-mail: roman\_pavlyuk\_v@mail.ru.

Received 14 April 2015