

Научная статья

УДК 631.363.2

EDN EXQUPW

DOI: 10.22450/19996837\_2023\_1\_111

## Измельчитель минеральных материалов для производства комбикормов

Виктор Викторович Садов<sup>1</sup>, Сергей Анатольевич Сорокин<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Алтайский государственный аграрный университет, Алтайский край, Барнаул, Россия

<sup>1</sup> [sadov.80@mail.ru](mailto:sadov.80@mail.ru), <sup>2</sup> [sorokin\\_sg@mail.ru](mailto:sorokin_sg@mail.ru)

**Аннотация.** Продуктивность сельскохозяйственных животных в значительной степени зависит от сбалансированного рациона. Особое значение отводится минеральным компонентам, которые вносятся в корма в небольшом количестве. Неравномерный состав этих материалов неблагоприятно влияет на однородность всей смеси. Для решения проблемы была спроектирована и изготовлена молотковая дробилка с некоторыми конструктивными особенностями. Для устойчивого истечения минерального материала в измельчитель была получена теоретическая зависимость, позволяющая найти величину коэффициента истечения. Определены гидравлические радиусы выпускных отверстий различных форм и на основании этого установлена оптимальная форма загрузочного окна. Экспериментальные исследования были проведены на поваренной соли, как представителе с изменяющимися физико-механическими свойствами. Результаты исследования позволили получить зависимости влияния производительности измельчителя на модуль помола и энергоёмкость процесса, а также выявить влияние угловой скорости ротора на данные параметры.

**Ключевые слова:** измельчитель, молотки, минеральные компоненты, модуль помола, энергоёмкость процесса, угловая скорость

**Для цитирования:** Садов В. В., Сорокин С. А. Измельчитель минеральных материалов для производства комбикормов // Дальневосточный аграрный вестник. 2023. Том 17. № 1. С. 111–119. doi: 10.22450/19996837\_2023\_1\_111.

Original article

## Grinder of mineral materials for the production of animal feed

Viktor V. Sadov<sup>1</sup>, Sergey A. Sorokin<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Altai State Agricultural University, Altai krai, Barnaul, Russia

<sup>1</sup> [sadov.80@mail.ru](mailto:sadov.80@mail.ru), <sup>2</sup> [sorokin\\_sg@mail.ru](mailto:sorokin_sg@mail.ru)

**Abstract.** The productivity of farm animals largely depends on a balanced diet. The mineral components, introduced into the feed in small quantities are of particular importance. The uneven composition of these materials does not favorably affect the uniformity of the entire mixture. To solve the problem, a hammer grinder with some design features was designed and manufactured. For a stable outflow of mineral material into the grinder, a theoretical dependence was obtained, which made it possible to find the value of the outflow coefficient. The hydraulic radius of the outlet openings of various shapes were determined, and on the basis of this, the optimal shape of the loading window was determined. Experimental studies were carried out on table salt as a representative with changing physical and mechanical properties. The results of the study made it possible to obtain the dependencies of the influence of the grinder performance on the grinding module and the energy intensity of the process. The influence of the angular velocity of the rotor on these parameters was also revealed.

**Keywords:** grinder, hammers, mineral components, grinding module, energy intensity of the process, angular velocity

**For citation:** Sadov V. V., Sorokin S. A. Izmel'chitel' mineral'nyh materialov dlja proizvodstva kombikormov [Grinder of mineral materials for the production of animal feed]. *Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik. – Far Eastern Agrarian Bulletin.* 2023; 17; 1: 111–119. (in Russ.). doi: 10.22450/19996837\_2023\_1\_111.

**Введение.** Полноценное кормление животных подразумевает обеспечение организма необходимыми питательными веществами, в том числе белковыми, витаминными, минеральными и другими.

Данные вещества входят в суточный рацион животных в незначительном количестве – от нескольких граммов до нескольких десятков граммов [1]. Малое количество этих веществ вызывает сложность для получения высокой однородности кормовой смеси.

Минеральные вещества, такие как соль, мел кормовой, известняки, кормовые фосфаты, ракушечник и другие, являются веществами природного происхождения, и поэтому размеры их частиц значительно отличаются друг от друга. Например, согласно ГОСТ Р 51574–2018 «Соль пищевая. Общие технические условия», соль для крупного рогатого скота применяется для помола № 2 в виде крупинок в основном меньше 2,5 мм, и до 5 % крупинок больше 4 мм; для помола №3 (самый крупный) подразумевает основной размер гранул до 4 мм, и 15 % гранул могут быть более крупными.

Кроме того, некоторые вещества имеют частицы значительных размеров, а также склонны к слеживаемости и нарушению сыпучести. В этом случае необходимо применять дополнительные устройства, а именно питатели, ворошилки, побудители и прочее. Но и при этом имеющиеся агломераты мешают обеспечению равномерной подачи и высокой однородности производимых кормов.

Решение данной проблемы видится в измельчении минерального сырья для получения более выровненного гранулометрического состава с дальнейшим внесением его в кормовые смеси.

**Цель исследования – получение выровненного гранулометрического состава минеральных компонентов за счет их**

**измельчения для приготовления кормовых смесей в животноводстве.**

**Методы исследования.** Наиболее распространенными измельчителями в сельском хозяйстве являются молотковые дробилки за счет простоты их конструкции, легкости регулировки модуля помола, надежности и др. В основном они применяются для измельчения зернобобовых кормов [2, 3, 4, 5].

Минеральные компоненты в сельскохозяйственных предприятиях, как правило, не измельчаются, что вызвано отсутствием необходимого оборудования и усложнением технологической схемы производства [6, 7]. Используется материал тех фракций, которые имеются в наличии, а это ведет к вышеуказанным недостаткам. Особый интерес представляет соль из-за наличия особых физико-механических свойств.

Ранее нами было установлено, что с ростом подачи, ведущей к увеличению энергопотребления измельчающей машины, снижается количество переизмельченного материала [8]. Был обнаружен эффект увеличения эффективности работы измельчителя, выраженный приростом производительности до 38 %, от уровня работы при загрузке через щель, образованную шиберной заслонкой прямоугольной формы. Это говорит о значительном влиянии на рабочий процесс равномерности подачи измельчаемого материала.

Равномерность истечения сыпучего тела из бункера зависит от множества параметров. Характер подачи измельчаемого материала в мельницу представленной конструкции определяется скоростью потока, зависящей от давления столба материала в бункере и избыточного давления воздушно-продуктовой смеси рабочей камеры [9].

Максимально возможная равномерность будет достигнута в случае ламинарного течения измельчаемого продукта.

Суть процесса подачи измельчаемой соли в молотковой дробилке в следующем. После открытия заслонки неизмельченная соль в объеме вертикального столба приходит в движение; на поверхности в бункере образуется воронка, по стенкам которой скатываются частицы, пополняя уменьшение материала в центральной зоне.

При нормальном характере истечения материала из бункера схематично обозначим столб внутри материала площадью основания  $S_0$ , равной площади выгрузного отверстия, и высотой  $\Delta h$ ; выделим элементарный объем над ним (рис. 1).

Примем допущения, что высота участка  $\Delta h$  мала и сила трения о боковые поверхности с инерцией в отношении движущих сил также малы, а потому в расчет их не включаем.

Тогда скорость рассматриваемого элемента, в момент выхода из сечения заслонки, можно найти, приравнявая кине-

тическую энергию этого элементарного объема разности работ  $(P_d - F_u)$  на пути  $\Delta h$ :

$$(P_d - F_u)\Delta h = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (1)$$

где  $P_d$  – сила давления материала в бункере от его тяжести, Н;

$F_u$  – центробежная сила инерции воздушно-солевой смеси в камере измельчения, создаваемая ротором, Н;

$m$  – масса выделенного объема соли, кг.

Выразим массу через объем и объемный вес:  $m = \Delta h \cdot S_0 \cdot \rho$ , и из выражения (1) получим:

$$v = \sqrt{\frac{2(P_d - F_u)}{S_0 \cdot \rho}} \quad (2)$$

где  $\rho$  – объемный вес сыпучего материала, кг/м<sup>3</sup>.

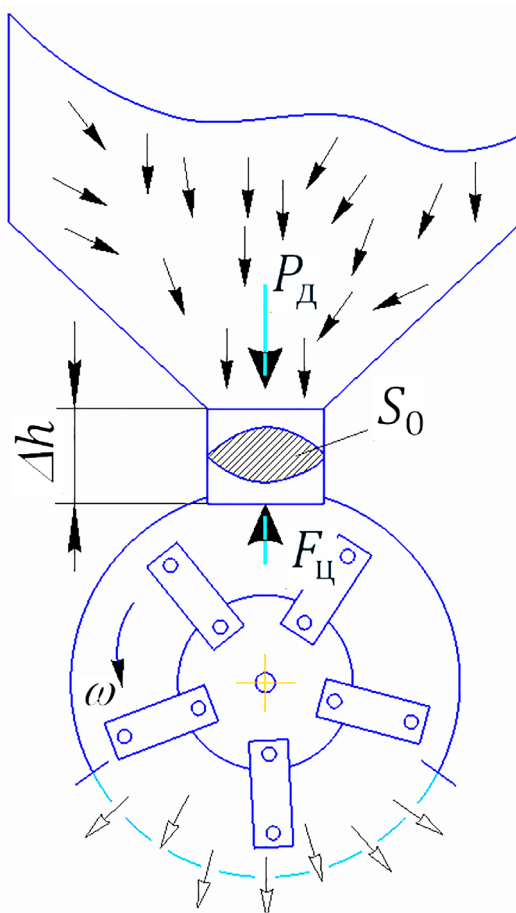


Рисунок 1 – Движение соли в камеру измельчения и расположение сил в сечении выпускного сечения

Сила набегающего снизу, из камеры измельчения, потока зависит от конструктивных особенностей ротора с молотками, угловой скорости и радиуса вращения рабочих органов (3):

$$F_{ц} = k \cdot m \cdot \omega^2 \cdot r \quad (3)$$

где  $k$  – эмпирический коэффициент, учитывающий особенности конструкции камеры измельчения;

$\omega$  – угловая скорость ротора, рад/с;

$r$  – радиус вращения рабочих органов, м.

Отношение  $(P_o - F_y)/S_o$  показывает усредненное вертикальное давление на площади сечения заслонки. Тогда уравнение (2) примет вид:

$$v = \sqrt{\frac{2\delta}{\rho}} \quad (4)$$

В реальности скорость истечения будет меньше, поскольку нужно учесть потери энергии на межслоевое трение внутри потока материала, возникающее в поперечном сечении при неизбежной разности скорости частиц.

Для учета этих потерь введем корректирующий коэффициент  $\mu$ , принимающий значения меньше единицы. Выражение скорости при этом будет выглядеть следующим образом:

$$v = \mu \sqrt{\frac{2\delta}{\rho}} \quad (5)$$

где  $\mu$  – коэффициент истечения.

При течении идеально сыпучих материалов вертикальное давление равно:

$$\delta = R_r \cdot \rho \cdot g \cdot x, \quad (6)$$

$$x = \frac{1}{f_0} + 2f_0 - \sqrt{1 + f_0^2} \quad (7)$$

где  $R_r$  – гидравлический радиус выпускного сечения, ограниченного заслонкой, м;

$x$  – коэффициент, отвечающий за величину взаимного сцепления частиц в сыпучем материале, определяемый для сыпучих тел формулой (7);

$f_0$  – коэффициент внутреннего трения сыпучего материала;

$g$  – ускорение свободного падения (силы тяжести) (равно 9,81 м/с<sup>2</sup>).

Подставляя эти значения в выражение (5) и учитывая, что  $x = 1,6$  (для большинства насыпных грузов), получим:

$$v = 5,65 \mu \sqrt{R_r} \quad (8)$$

Таким образом, определяем скорость потока материала через пропускную способность заслонки, при тестовых испытаниях измельчителей по формуле (9):

$$Q_{изм} = 3,6 \cdot S_o \cdot \rho \cdot v \quad (9)$$

Получаем возможность найти  $\mu$  – коэффициент истечения, который при дальнейшем использовании даст прогнозируемый результат по скорости течения материала и его количеству.

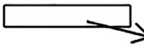
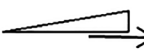
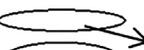
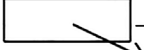

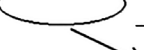



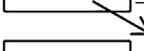
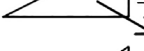




Видим, что определяющим параметром производительности и равномерности истечения, посредством скорости, является гидравлический радиус. Им называют величину в виде отношения площади к периметру сечения, через которое течет сыпучий материал либо жидкость.

Для наглядного восприятия и анализа этой величины представим рисунок с сечениями прямоугольной, треугольной и эллипсовидной формы (рис. 2). Гидравлический радиус определяем по формуле (10):

$$R_r = S/L \quad (10)$$

Форма сечения выбиралась из условия наибольшей производительности истечения сыпучего материала исходя на рекомендации экспертов, и на основании собственных результатов лабораторных испытаний. Длину линии периметра выбирали наименьшей по отношению к площади поперечного сечения.

**Результаты исследования.** При разработке измельчителя для минеральных компонентов в качестве прототипа использовали зерновую молотковую дро-

Прямоугольник	S	L	$R_{г}=S/L$	Треугольник	S	L	$R_{г}=S/L$	Эллипс	S	L	$R_{г}=S/L$
	150	70	<b>2,143</b>		75	65	<b>1,154</b>		118	62	<b>1,903</b>
	300	80	<b>3,75</b>		150	72	<b>2,083</b>		235	67	<b>3,507</b>
	450	90	<b>5</b>		225	77	<b>2,922</b>		353	72	<b>4,903</b>
	600	100	<b>6</b>		300	86	<b>3,488</b>		471	79	<b>5,962</b>
	900	120	<b>7,5</b>		450	102	<b>4,412</b>		707	94	<b>7,521</b>

**Рисунок 2 – Гидравлические радиусы выпускных отверстий**

билку с определенными конструктивными особенностями (рис. 3):

1) конструкцией ротора предусмотрена возможность установки разного количества осей с молотками;

2) из-за высокой плотности минеральных компонентов, по сравнению с зерновыми, увеличено количество молотков на каждой из осей;

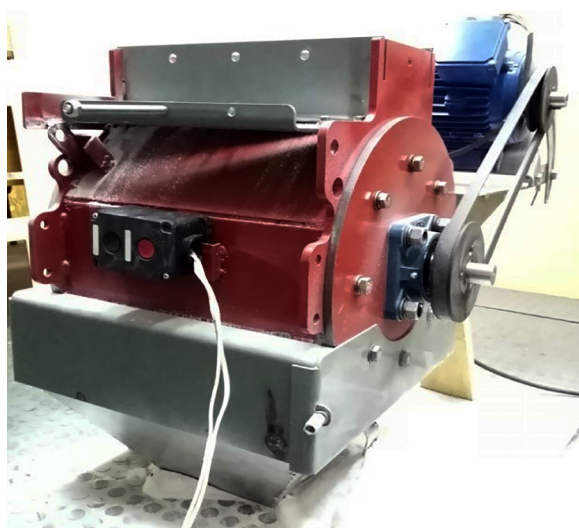
3) значительная масса ротора имеет при работе достаточную инерцию, что способствует эффективному разрушению крупных частиц;

4) загрузка рабочей камеры производится по всей длине;

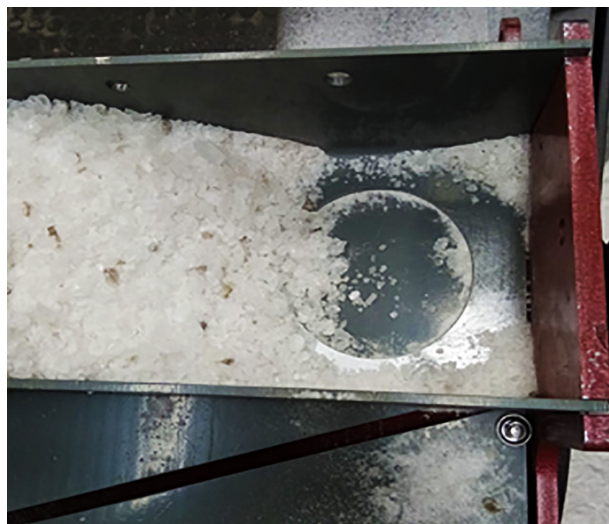
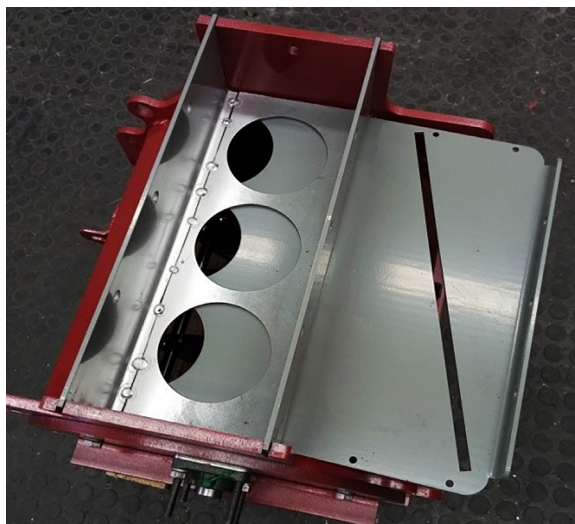
5) подшипниковые опоры имеют дополнительную защиту с внутренней стороны камеры ротора от попадания измельченных минеральных веществ.

Измельчитель имеет следующие параметры: диаметр ротора – 0,35 м, длина ротора – 0,35 м, мощность двигателя – 7,5 кВт, решето – 3 мм, количество молотков – 72 шт.

Экономически целесообразно и технологически эффективно использо-



**Рисунок 3 – Общий вид измельчителя и ротор (решето убрано)**



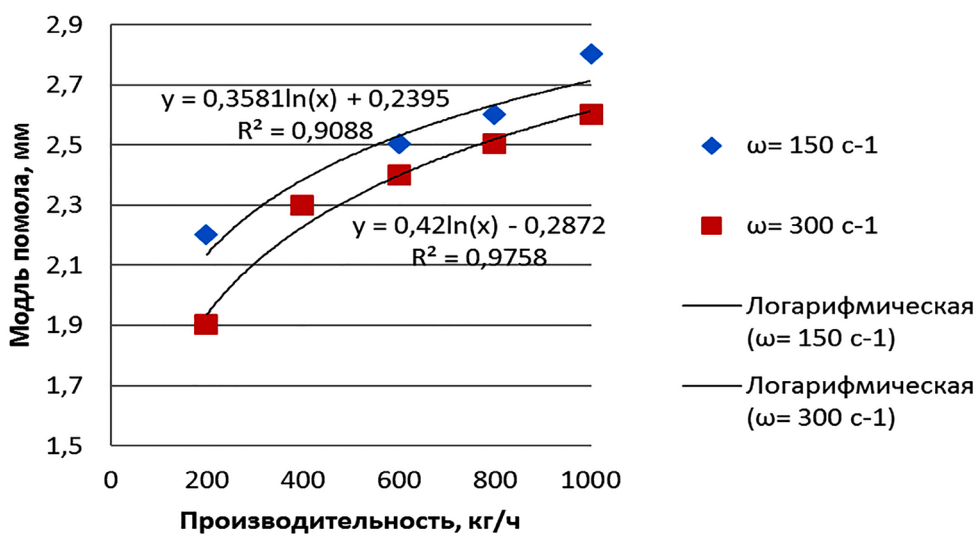
**Рисунок 4 – Загрузочные отверстия**

вать форму выпускного сечения в виде квадрата или круга, так как у них максимальная величина радиуса, что видно из теоретического исследования. Наибольшая пропускная способность у круглого отверстия, но квадрат отстает по этому показателю только на 0,021 (0,28 %). С точки зрения производительности это незначительно, а технологически в ряде случаев изготовить и регулировать размер квадратного сечение проще.

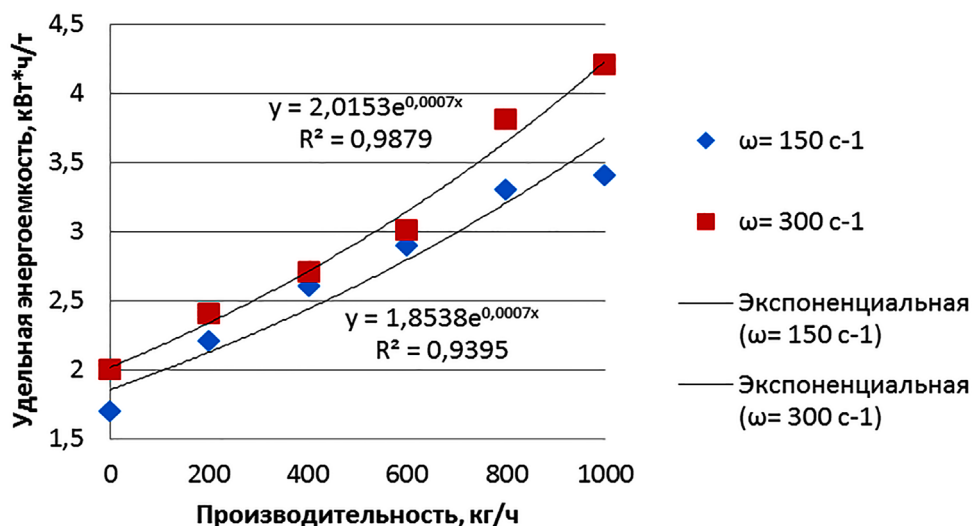
В конструкции измельчителя соли использовали шиберную заслонку с отверстиями круглой формы (рис. 4). При этом бункер с исходным материалом не показан.

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить модуль помола в зависимости от производительности измельчителя (рис. 5), а также энергоёмкость процесса (рис. 6) на различных оборотах.

Так, при скорости молотка 26 м/с (1 450 об/мин) наблюдается увеличение модуля помола от 9 до 14 % по сравнению со скоростью 52 м/с (2 870 об/мин) в рамках исследуемой производительности. Напротив, увеличение скорости молотка увеличило энергоёмкость процесса с 11 до 15 %.



**Рисунок 5 – Зависимость модуля помола соли от производительности**



**Рисунок 6 – Влияние производительности измельчителя на удельную энергоёмкость**

**Выводы.** 1. Получена теоретическая зависимость, позволяющая найти величину коэффициента истечения, дающую наиболее благоприятные сочетания конструктивных и кинематических параметров загрузочного устройства.

2. Производительность измельчителя в значительной степени зависит от геометрических параметров загрузочной горловины и вида шиберной заслонки. Эффективность измельчения растёт про-

порционально повышению равномерности течения сыпучего материала в рабочую камеру.

3. Процесс измельчения минеральных материалов молотковой дробилкой показал высокую эффективность при низкой энергоёмкости процесса. Увеличение скорости молотков приводит к уменьшению модуля помола и увеличению удельной энергоёмкости.

#### Список источников

1. Минеральные элементы в кормах и методы их анализа : монография / В. М. Косолапов, В. А. Чуйков, Х. К. Худякова, В. Г. Косолапова. М. : Угрешская типография, 2019. 272 с.
2. Кукта Г. М. Машины и оборудование для приготовления кормов. М. : Агропромиздат, 1987. 303 с.
3. Мельников С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. Ленинград : Колос, 1978. 560 с.
4. Воякин С. В., Щитов С. В., Кузнецов Е. Е. Результаты исследований по получению кормового продукта для молодняка сельскохозяйственных животных // Дальневосточный аграрный вестник. 2021. № 4 (60). С. 165–172.
5. Школьников П. Н., Кузнецов Е. Е., Щитов С. В. Снижение энергетических затрат при приготовлении и раздаче кормовых рационов // Энергосбережение и энергоэффективность: проблемы и решения : материалы IX всерос. (нац.) науч.-практ. конф. Нальчик : Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет, 2020. С. 184–189.
6. Федоренко И. Я., Садов В. В. Структурная сложность технологической системы комбикормового цеха // Вестник АПК России. 2017. Т. 24. № 2. С. 437–442.
7. Воякин С. В., Щитов С. В., Кузнецов Е. Е. Влияние основных конструктивно-технологических параметров измельчителя-пастоизготовителя на энергоэффективность приготовления кормов // Дальневосточный аграрный вестник. 2021. № 3 (59). С. 72–77.

8. Садов В. В., Сорокин С. А. Повышение эффективности измельчения зерновых компонентов за счет оптимальной загрузки молотковой дробилки // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 3 (197). С. 100–106.

9. Шубин И. Н., Свиридов М. М., Таров В. П. Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства : учебное пособие. Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, 2005. 76 с.

### References

1. Kosolapov V. M., Chuikov V. A., Khudyakova Kh. K., Kosolapova V. G. *Mineral'nye elementy v kormakh i metody ikh analiza: monografiya [Mineral elements in feed and methods of their analysis: monograph]*, Moskva, Ugreshskaya tipografiya, 2019, 272 p. (in Russ.).

2. Kukta G. M. *Mashiny i oborudovanie dlya prigotovleniya kormov [Machines and equipment for feed preparation]*, Moskva, Agropromizdat, 1987, 303 p. (in Russ.).

3. Mel'nikov S. V. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya zhivotnovodcheskikh ferm [Mechanization and automation of livestock farms]*, Leningrad, Kolos, 1978, 560 p. (in Russ.).

4. Voyakin S. V., Shchitov S. V., Kuznetsov E. E. Rezul'taty issledovaniy po polucheniyu kormovogo produkta dlya molodnyaka sel'skokozyajstvennykh zhivotnykh [The results of research on obtaining a feed product for young farm animals]. *Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik. – Far Eastern Agrarian Bulletin*, 2021; 4 (60): 165–172 (in Russ.).

5. Shkolnikov P. N., Kuznetsov E. E., Shchitov S. V. Snizhenie energeticheskikh zatrat pri prigotovlenii i razdache kormovykh racionov [Reduction of energy costs in the preparation and distribution of feed rations]. Proceedings from Energy saving and energy efficiency: problems and solutions: *IX Vserossiyskaya (nacional'naya) nauchno-prakticheskaya konferenciya. – IX All-Russian (National) Scientific and Practical Conference*. (PP. 184–189), Nal'chik, Kabardino-Balkarskiy gosudarstvennyy agrarnyj universitet, 2020 (in Russ.).

6. Fedorenko I. Ya., Sadov V. V. Strukturnaya slozhnost' tekhnologicheskoi sistemy kombikormovogo tsekha [Structural complexity of the technological system of the feed mill]. *Vestnik APK Rossii. – Bulletin of the Agroindustrial Complex of Russia*, 2017; 24; 2: 437–442 (in Russ.).

7. Voyakin S. V., Shchitov S. V., Kuznetsov E. E. Vliyanie osnovnykh konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov izmel'chatelya-pastoizgotovatelya na energoeffektivnost' prigotovleniya kormov [The influence of the main design and technological parameters of the shredder-paste maker on the energy efficiency of feed preparation]. *Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik. – Far Eastern Agrarian Bulletin*, 2021; 3 (59): 72–77 (in Russ.).

8. Sadov V. V., Sorokin S. A. Povyschenie effektivnosti izmel'cheniya zernovykh komponentov za schet optimal'noi zagruzki molotkovo drobilki [Improving of the efficiency of grinding grain components due to the optimal loading of a hammer crusher]. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 2021; 3 (197): 100–106 (in Russ.).

9. Shubin I. N., Sviridov M. M., Tarov V. P. *Tekhnologicheskie mashiny i oborudovanie. Syпuchie materialy i ikh svoystva: uchebnoe posobie [Technological machines and equipment. Bulk materials and their properties: textbook]*, Tambov, Tambovskij gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet, 2005, 76 p. (in Russ.).

© Садов В. В., Сорокин С. А., 2023

Статья поступила в редакцию 19.01.2023; одобрена после рецензирования 20.02.2023; принята к публикации 02.03.2023.

The article was submitted 19.01.2023; approved after reviewing 20.02.2023; accepted for publication 02.03.2023.



**Информация об авторах**

**Садов Виктор Викторович**, доктор технических наук, доцент, Алтайский государственный аграрный университет, [sadov.80@mail.ru](mailto:sadov.80@mail.ru);

**Сорокин Сергей Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, Алтайский государственный аграрный университет, [sorokin\\_sg@mail.ru](mailto:sorokin_sg@mail.ru)

**Information about authors**

**Viktor V. Sadov**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Altai State Agricultural University, [sadov.80@mail.ru](mailto:sadov.80@mail.ru);

**Sergey A. Sorokin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Altai State Agricultural University, [sorokin\\_sg@mail.ru](mailto:sorokin_sg@mail.ru)