

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-1-2566>
<https://elibrary.ru/EFPCUF>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Молотковые зернодробилки: классификация и методика оценки эффективности



А. А. Мезенов^{1,*}, Н. Н. Григорев¹, Н. И. Кашеваров²

¹ Новосибирский государственный аграрный университет^{ROR}, Новосибирск, Россия

² Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Краснообск, Россия

Поступила в редакцию: 26.09.2024

Принята после рецензирования: 20.11.2024

Принята к публикации: 01.12.2024

*А. А. Мезенов: artemnsau@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0002-6513-6414>

Н. Н. Григорев: <https://orcid.org/0000-0001-8357-0620>

Н. И. Кашеваров: <https://orcid.org/0009-0003-3207-483X>

© А. А. Мезенов, Н. Н. Григорев, Н. И. Кашеваров, 2025



Аннотация.

Измельчение зерна в технологии получения концентрированных комбикормов является одной из сложнейших и энергозатратных технологических операций. Производители молотковых дробилок зерна предоставляют только техническую характеристику машин, не дополняя ее основными технологическими и экономическими показателями работы, что вызывает трудности при приобретении зернодробилок. Цель исследования – уточнение классификации молотковых зернодробилок и разработка методики оценки их эффективности.

Объектами исследования послужили конструктивные и технико-экономические показатели молотковых дробилок сельскохозяйственного назначения. Применили расчетный и аналитический методы оценки показателей удельных металлоемкости и энергозатрат, характеризующих совершенство конструкции и технологической схемы, эффективность работы существующих зернодробилок. Основу исследования составили технико-экономические показатели российских и зарубежных молотковых дробилок, выделенных по типу загрузки рабочей камеры на механические и пневматические.

Проведенный анализ конструкций и технико-экономических показателей пневматических и механических молотковых дробилок позволил составить их классификацию по конструкции, виду рабочей камеры, количеству стадий, способу подачи материала, ориентированию вала ротора, наличию решет и дек, количеству дисков и способу отвода материала из камеры измельчения. Составлена таблица, в которой наиболее полно на сегодняшний день отражены технико-экономические показатели для разных типов и марок дробилок. Для оценки эффективности применения пневматических и механических зернодробилок предложено ввести комплексный показатель совершенства молотковой дробилки, который учитывает удельную металлоемкость и удельные энергозатраты. Расчет показателя для пневматических и механических типов молотковых дробилок производительностью до 1, 1–3, 3–5, 5–10, более 10 т определил диапазон его значения от 0,1 до 2,22 (кВт·ч×т_м)/т, при этом для более эффективной зернодробилки он принимает наименьшее значение.

Введение комплексного показателя совершенства конструкции дробилки позволяет упростить выбор зернодробилки потребителем. Методика выбора может опираться на графическое представление данного показателя. Результаты проведенного исследования позволили определить направления совершенствования конструкции молотковых дробилок.

Ключевые слова. Зерно, дробление зерна, молотковая дробилка, пневматическая молотковая дробилка, механическая молотковая дробилка, энергоэффективность, удельная металлоемкость, удельные энергозатраты, производительность

Для цитирования: Мезенов А. А., Григорев Н. Н., Кашеваров Н. И. Молотковые зернодробилки: классификация и методика оценки эффективности. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 1. С. 214–225. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-1-2566>

Hammer Grain Crushers: Classification and Efficiency Assessment

Artem A. Mezenov^{1,*}, Nikolai N. Grigorev²,
Nikolai I. Kashevarov²

¹ Novosibirsk State Agricultural University^{}, Novosibirsk, Russia

² Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Russia

Received: 26.09.2024
Revised: 20.11.2024
Accepted: 01.12.2024

*Artem A. Mezenov: artemnsau@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-6513-6414>
Nikolai N. Grigorev: <https://orcid.org/0000-0001-8357-0620>
Nikolai I. Kashevarov: <https://orcid.org/0009-0003-3207-483X>

© A.A. Mezenov, N.N. Grigorev, N.I. Kashevarov, 2025



Abstract.

Grain milling is one of the most complex and energy-consuming procedures in the technology of concentrated mixed fodders. Unfortunately, manufacturers provide hammer grain crushers only with technical characteristics, supplying neither technological nor economic performance indicators, which makes it difficult for consumers to select the optimal machine. The article introduces a classification of hammer grain crushers and a methodology for assessing their energy efficiency.

The design, technical, and economic indicators of agricultural hammer crushers were obtained by calculation and analysis of specific metal intensity and energy consumption. The data pool consisted of technical and economic indicators of domestic and foreign hammer crushers, divided into mechanical and pneumatic ones by the type of loading.

The classification relied on the following properties: the type of design, working chamber, feeding, removal, and orientation of the rotor shaft; the presence or absence of grates and decks; the number of stages and discs. The classification was structured as a table of technical and economic indicators for different types and brands. The authors introduced a complex performance index to assess the efficiency of pneumatic and mechanical grain crushers. It took into account the metal consumption and energy consumption. For pneumatic and mechanical hammer crushers with a productivity of ≤ 1 , 1–3, 3–5, 5–10, and ≥ 10 t, the index varied from 0.1 to 2.22 (kWt/h/t_m)/t: the more efficient the crusher, the lower the index value.

The complex performance index and its graphical representation simplify the selection procedure for the consumer. The results obtained demonstrate the improvement prospects for hammer crushers design.

Keywords. Grain, grain crushing, hammer crusher, pneumatic hammer crusher, mechanical hammer crusher, energy efficiency, specific metal consumption, specific energy consumption, performance

For citation: Mezenov AA, Grigorev NN, Kashevarov NI. Hammer Grain Crushers: Classification and Efficiency Assessment. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(1):214–225. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-1-2566>

Введение

Продуктивные качества и здоровье животных зависят от кормовой базы и организации кормления на 60 %. Полноценность кормления обуславливается сбалансированностью рационов, которые в течение всего периода жизни животных должны удовлетворять их потребности в питательных, минеральных веществах и витаминах.

В животноводстве в кормлении животных, птиц и рыб повсеместно используют специальные комбинированные корма, требования к качеству которых постоянно растут [1]. В первую очередь это относится к питательности кормов, улучшению их санитарного состояния, эффективному использованию сырьевых

ресурсов [2]. Использование кормов низкого качества приведет как к снижению продуктивности животных, так и к увеличению удельных затрат на производство животноводческой продукции.

Основным ингредиентом для производства комбикормов сельскохозяйственных животных является фуражное зерно злаковых культур. Сельскохозяйственному предприятию экономически выгодно производить концентрированные корма из собственных продуктов растениеводства. Для производства качественного комбикорма необходима поточно-технологическая линия, в которую входит ряд технологического оборудования, выполняющего следующие задачи: подготовка, измельчение зерна и дополнительных ингредиентов,

смешивание до однородной массы, раздача готового комбикорма. Самым энергозатратным процессом в механизации приготовления кормов является измельчение. Необходимость измельчения зерна обусловлена физиологией пищеварительной системы животных: питательные вещества и составные части измельченного продукта лучше распадаются на простые элементы, что облегчает процессы пережевывания, переваривания и переработки продукта желудочным соком.

Для качественного измельчения развитие животноводческой отрасли требует эффективное оборудование, отвечающее технологическим требованиям производства комбикормов. Сегодня при выборе оборудования для измельчения зерна определяющими факторами являются производительность, мощность, долговечность, возможность интегрирования в технологическую линию, цена. Требования к измельчающим машинам зависят от рецептуры комбикорма, его гранулометрического состава. Сельхозтоваропроизводители вынуждены постоянно изучать рынок оборудования для подбора технически и технологически совершенных машин, обеспечивающих требуемый размер целевой фракции для корма, при этом выбранное оборудование должно иметь быструю окупаемость финансовых вложений. Как правило, в открытых источниках приводится рекламная информация о характеристиках измельчающих зернодробилок, а существующая классификация содержит большое количество параметров, что значительно осложняет анализ и выбор при приобретении измельчителя животноводческими предприятиями.

С целью получения продукции заданного качества и снижения удельных энергозатрат в настоящее время применяются различные способы измельчения материала механическим воздействием рабочих органов [3–6]. Выбор способа определяется рядом факторов: технологическими (физико-механические свойства исходного материала, предварительная подготовка материала, степень и качество измельчения материала), режимными (окружная и линейная скорости рабочих органов, их величина, способ и место загрузки) и конструктивными (размеры рабочей камеры конструкции, количество рабочих органов, организация воздушного режима). Влияние данных факторов оказывает важное влияние на развитие конструктивно-технологических схем машин для измельчения материала.

При механическом способе измельчения зерна чаще всего используются два процесса: резание и дробление [7–11]. Резание является наименее энергоемким процессом. Однако сухое зерно, влажность которого составляет порядка 14 %, по физико-механическим свойствам сравнимо с абразивным материалом, из-за чего происходит интенсивный износ ножей, что и ограничивает использование способа резания. Дробление обуславливается способностью материала разрушаться под многократным ударным воздействием путем создания новых и развития уже имеющихся трещин. В большинстве случаев фуражное зерно измельчают ударами

и раздавливанием с применением других видов разрушения, в зависимости от конструктивных особенностей измельчителя и требуемого гранулометрического состава, и промежуточным просеиванием продуктов измельчения. При динамическом нагружении зерна напряжение вдвое больше, чем при статическом. Динамическое нагружение возможно реализовать в дробилках ударного действия. Дробление материала ударным разрушением в молотковой дробилке обеспечивает более высокую эффективность по сравнению с раздавливанием в щековых или конусных дробилках.

Таким образом, в технологических линиях по приготовлению кормов для животных в основном применяются дробилки ударного действия, а именно молотковые. Но при использовании дробилок данного типа потребитель зачастую также сталкивается с рядом проблем. Возникающие проблемы имеют как качественный, так и количественный характер, а их решение возможно лишь посредством устранения основных недостатков молотковых дробилок (повышенное содержание пылевидной фракции, неоднородность гранулометрического состава, относительно высокие удельные энергозатраты технологического процесса измельчения).

Цель исследования – уточнение классификации молотковых зернодробилок и разработка методики оценки их эффективности.

Задачи научного исследования:

- проанализировать существующие виды молотковых дробилок, составить их классификацию;
- определить технико-экономические показатели удельной металлоемкости, удельных энергозатрат, затрат энергии на работу молотковой дробилки;
- предложить методику оценки эффективности молотковых дробилок, учитывающую основные показатели, выявить наиболее эффективные.

Объекты и методы исследования

Существующая классификация охватывает все зернодробилки без выделения пневматических, отличительной чертой которых является всасывающе-нагнетательный принцип работы. Дробилки данного типа обладают рядом преимуществ:

- отсутствие дополнительных транспортеров и транспортных лент;
- отсутствие дополнительных узлов в приводе;
- отсутствие в дробильном барабане дополнительных устройств, замедляющих процесс измельчения;
- наличие в конструкции сепаратора для выделения металлических и минеральных примесей;
- большое количество предприятий по производству пневматических дробилок российского и иностранного производства;
- достаточная производительность для работы в составе малогабаритных комбикормовых заводов.

С целью составления классификации зернодробилок проведен технико-экономический анализ устройств, выпускаемых в мире. Несмотря на большое количе-

ство параметров, характеризующих работу молотковых дробилок, можно выделить два основных типа – с механической и пневматической подачей зерна в камеру дробления.

Дробилки с механической подачей измельчаемого материала загружают зерно в зависимости от принятой конструктивной особенности через верхний, боковой и радиальный патрубок. Загрузка может быть организована самотеком или с помощью питателя. В случае подачи материала на измельчение самотеком производительность регулируется открытием заслонки, а питателем – скоростью работы нагнетающего устройства. Попадая в рабочую зону, зерно вовлекается в круговое движение молотковым ротором, где под действием молотков, деки и решета измельчается.

Простота в обслуживании и надежность в эксплуатации послужили широкому выпуску дробилок с механической подачей различными российскими или зарубежными производителями. Большинство из них универсальны и используются для измельчения различных культур до требуемого гранулометрического размера в зависимости от зоотехнических требований к комбикорму. Достоинствами таких дробилок являются простая конструкция, компактность, универсальность, возможность регулирования степени измельчения путем замены решета, возможность подбора производительности в широких диапазонах. К основным недостаткам можно отнести высокий расход электроэнергии, затрачиваемой не только на измельчение, но и на подачу исходного продукта в камеру дробления с последующим отводом, наличие в готовом продукте как переизмельченного, так и целого зерна, быстрый износ молотков, решета и дек дробилки.

Пневматические дробилки осуществляют загрузку исходного материала за счет создания вентилятором разрежения и выгрузку измельченного продукта под давлением воздуха. Материал для измельчения поступает в камеру дробления через центральный патрубок и подвергается измельчению, степень измельчения регулируется сепарирующей поверхностью в виде сменных решет с различным диаметром отверстий, установленных с охватом ротора на 360°. На сегодняшний день на рынке представлены пневматические дробилки

различных производителей как отдельный агрегат или в составе поточно-технологической линии, при этом сохраняются достоинства молотковых дробилок с механической подачей и минимизацией их основных недостатков. Одним из главных факторов, сдерживающим замещение дробилок с механической подачей зерна, являются более высокие энергозатраты на измельчение у пневматических дробилок. Несмотря на приведенный недостаток, применение пневматических дробилок в поточно-технологических линиях производства кормов для животных становится экономически выгодным за счет отсутствия необходимости в дополнительных устройствах для загрузки измельчаемого материала в дробилку с расстояния до 20 м и транспортировки продуктов дробления на последующие технологические операции.

Выбор предприятием молотковой дробилки с механической или пневматической подачей зерна не очевиден с точки зрения выполняемой технологической функции и требует всестороннего анализа и расчета, охватывающего технологические, энергетические и конструктивные параметры.

В таблице 1 представлены формулы для технико-экономических показателей удельной металлоемкости и удельных энергозатрат на основе производительности, а также энергии, затрачиваемой на работу машины.

На современном этапе развития техники и технологии молотковые дробилки для измельчения зерна однообразны, а принцип их действия – разрушение зернового материала путем удара и истирания. Молотковые дробилки, выпускаемые на сегодняшний день, имеют значительное количество модификаций (кинематические, технологические и конструктивные). Несмотря на широкий ассортимент выпускаемых молотковых зернодробилок, каждая имеет определенный набор рабочих органов: молотки, ротор, диски ротора, деки, решета. Отличительными характеристиками молотковых дробилок у разных производителей с одинаковой или близкой конструкцией является размер ротора, конструкция рабочих органов, размер и толщина ударных элементов, величина радиального зазора между молотками и поверхностью решета, тип питающего механизма, наличие деки, устройство для отвода

Таблица 1. Основные показатели энергоэффективности зернодробилок

Table 1. Energy efficiency of grain crushers

Наименование	Обозначение	Формула	Единица измерения
Производительность	Q	–	т/ч
Энергия, затрачиваемая на работу	E	–	кВт×ч
Масса дробилки	m	–	т _м
Удельные энергозатраты	$E_{уд}$	$E_{уд} = \frac{E}{Q}$	(кВт×ч)/т
Удельная металлоемкость	$m_{уд}$	$m_{уд} = \frac{m}{Q}$	(т _м ×ч)/т

продуктов измельчения, наличие вентилятора и др. конструктивные особенности. При этом указываются только стандартные показатели молотковых дробилок: производительность, энергия, затрачиваемая на измельчение тонны зерна, и масса оборудования. Этой информации недостаточно для выбора молотковой дробилки, т. к. она носит только ознакомительный характер и не позволяет оценить измельчитель.

Проведенный анализ технико-экономических показателей зернодробилок обуславливает целесообразность поиска обобщенной характеристики, которая позволила бы упростить выбор измельчителей зерна по этим показателям. Поэтому для оценки эффективности молотковой дробилки предлагается ввести комплексный показатель совершенства конструкции зернодробилки (K_n , (кВт×ч× T_m)/т), который учитывает как удельную металлоемкость, так и удельные энергозатраты:

$$K_n = E_{уд} \times m_{уд}$$

где $E_{уд}$ – удельные энергозатраты, (кВт×ч)/т; $m_{уд}$ – удельная металлоемкость, (T_m ×ч)/т.

Результаты и их обсуждение

На основании анализа изученных материалов и методов составлена классификация молотковых дробилок. Классификация дополнена таблицей значений технико-экономических показателей, рассчитанных для современных молотковых дробилок. Содержание приведенной таблицы позволяет проводить сравнение технико-экономических показателей, анализировать их эффективность по разным параметрам.

По виду рабочей камеры различают три типа молотковых дробилок, отличающихся по технологическому процессу дробления: открытый, полукоткрытый и закрытый. В дробилках открытого типа материал в дро-

Таблица 2. Классификация молотковых дробилок

Table 2. Classification of hammer crushers

Признак	Вид					
Вид рабочей камеры	 Закрытые					
	 Полуоткрытые					
	 Открытые					
Количество стадий	 Одностадийные					
	 Двухстадийные					
Способ подачи материала	 Самотеком	 Тангенциальная	 Радиальная	 Центральная	 Левая	
	 Принудительно				 Правая	
	 Комбинированно				Боковая	
Ориентация вала ротора	 Горизонтальное расположение					
	 Вертикальное расположение					
Наличие решет	 Решетные					
	 Безрешетные	 Без разделительной камеры				
		 С разделительной камерой				
Наличие деки	 Без деки					
	 С декой					
Количество дисков для крепления рабочих органов	 Однодисковые					
	 Многодисковые					

бильной камере подвергается ударному воздействию молотков или молотков и дек, в результате полученная измельченная смесь широкого размерного диапазона быстро удаляется, не замыкая при перемещении окружности. Совершенствование дробилок открытого типа направлено на включение в конструкцию различных видов сепараторов.

Дробилка закрытого типа организует циркуляцию материала в камере, в которой, помимо молотков и дек, установлено решето, регулирующее степень измельчения. Производительность дробилок закрытого типа ограничивается сепарирующей поверхностью решета, вследствие чего длительность измельчения зависит от времени доведения частиц дробленого продукта до размера прохода через решето, что приводит к увеличению пылевидной фракции и энергозатрат на измельчение.

Дробилки полукрытого типа расположены близко к дробилкам закрытого типа: имеют решето с частичным проходом продуктов дробления и выпускное отверстие с запирающим устройством, регулирующим время нахождения продукта в камере измельчения.

По количеству стадий выделяют одно и двухстадийные конструкции. Дробилки с механической подачей имеют конструктивную возможность реализовывать измельчение одной и двумя стадиями. В первом случае измельчение осуществляется молотками и деками с последующей сепарацией продуктов дробления через решето, во втором случае конструкция дробилки представляет собой две и более ступени измельчения: предварительную и окончательную. В зависимости от конструктивных элементов в каждую из ступеней входят измельчающий молотковый ротор и сепаратор или на первой ступени – измельчающий рабочий орган, а на завершающей – молотковый ротор и сепаратор.

Применение пневматических молотковых дробилок возможно как при одностадийном измельчении (в этом случае воздушный поток протягивает поступающий материал в камеру для измельчения и выгрузки продуктов дробления), так и двухстадийном. Организация второй стадии осуществляется при наличии разделительной камеры, из которой крупная фракция возвращается на доизмельчение. Организация двухстадийного измельчения на пневматической молотковой дробилке предпочтительнее, т. к. не требует установки дополнительного рабочего органа и сепаратора, увеличивающих энергозатраты на измельчение и металлоемкость конструкции.

По способу подачи материала выделяют самотек, принудительный и комбинированный способы. При подаче материала самотеком зерно поступает из бункера над дробилкой. При такой конструкции материал практически не подвергается воздействию молотков под загрузочным отверстием в момент поступления в дробильную камеру, а попадает под воздействие воздушного продуктового слоя и оттесняется к деке или решету. Таким образом траектория

движения зерна до встречи с молотком удлиняется, что снижает производительность и увеличивает энергозатраты дробилки.

Принудительно зерно подается в дробильную камеру с помощью механических питателей (в большинстве случаев шнековым или роторным). При движении зернового материала происходит трение, в результате которого образуется пылевидная фракция, что приводит к потерям продукции и увеличению нагрузки на молотковый ротор. Необходимо осуществлять контроль для поддержания уровня зерна в загрузочной воронке. Если подача материала над питателем непостоянная, то скорость заполнения его рабочего органа может значительно отклоняться, что, в свою очередь, становится причиной больших колебаний массовой скорости подачи в дробилку. Получающаяся в результате непостоянная скорость подачи зернового материала в рабочую камеру создает нежелательные расхождения в процессе измельчения и может повлечь большие потери производительности.

Другой вариант принудительной подачи – загрузка воздушным потоком вентилятора, установленным за молотковым ротором. Такая конструкция позволяет дополнительно установить сепаратор на крышке дробилки для удаления крупных минеральных примесей и пылевых фракций исходного материала. В конструкцию сепаратора так же входит магнит, улавливающий и отделяющий металлические примеси из исходного продукта.

Нагнетаемый поток воздуха, поступающий вместе с зерном, выполняет следующие функции:

1. Контроль температуры продукта во время измельчения. При измельчении материала наблюдается повышение температуры продукта. Чтобы предотвратить ухудшение качества продукта, тепло должно передаваться в воздушный поток. Температуру необходимо поддерживать ниже максимального уровня и предпочтительно в небольшом заданном диапазоне.

2. Оптимизация производительности дробилки. Уменьшение или увеличение скорости потока воздуха может снизить производительность измельчителя. Входящий поток воздуха в сочетании с подачей материала следует по заранее определенному пути внутри дробилки. Цель состоит в том, чтобы использовать турбулентность в потоке воздуха для оптимизации удара материала о молотки (молотки и деки) и истирания материала о материал. Снижение скорости воздушного потока может привести к чрезмерному накоплению продукта внутри дробилки, что приведет к высоким энергетическим затратам и повышенным нагрузкам на рабочие органы измельчителя.

3. Прохождение материала заданного гранулометрического состава через сита. Нагнетаемый поток воздуха (с некоторой помощью вращающихся молотков) обеспечивает дифференциальное давление и массовый расход-среду, необходимые для протягивания материала заданного размера через сита. Значение

скорости воздушного потока является основным показателем эффективности дробления. Уменьшение скорости потока воздуха приведет к нежелательному уменьшению размера частиц, в то время как увеличение скорости потока воздуха выдавит через отверстия сита материал большего размера, чем требуется.

4. Обеспечение транспортировки продуктов дробления воздушным потоком. Уровня нагнетаемого воздушного потока также достаточно для транспортировки измельченного материала в технологическое оборудование поточно-технологической линии производства комбикормов.

Комбинированный способ реализуется только в дробилках с механической подачей и за счет установки шнекового питателя в горловине загрузочного бункера.

Большое влияние оказывает расположение загрузочной горловины для ввода материала в дробилку, различают тангенциальное, радиальное, центральное и боковое расположение. Радиальная подача реализуется в конструкциях с вертикальным расположением вала, а тангенциальная, центральная и боковая подачи – с горизонтальным валом. При центральной загрузке дробильной камеры возможна установка решета с углом охвата $90\text{--}360^\circ$, при радиальной загрузке зерна угол охвата – $120\text{--}360^\circ$.

Анализ современных применимых на производстве дробилок показал, что единого конструктивного решения по выбору способа подачи не существует. Практический опыт заводов производителей требует использования того или иного варианта подачи.

Возможны два варианта ориентации ротора измельчителя – горизонтальный и вертикальный. При горизонтальном расположении молоткового ротора наблюдается неравномерный выход продуктов дробления через решето, а наиболее интенсивное просеивание осуществляется в нижней части решета, что приводит к истиранию его материала и препятствует своевременному выходу измельченных частиц из камеры дробления. В результате пропускная способность дробилки уменьшается.

Вертикальное расположение ротора позволяет производить вывод измельченного материала как через боковую поверхность сита, так и через перфорированное днище, что способствует уменьшению времени нахождения измельчаемого продукта в рабочей камере и появлению пылевой фракции. Такая конструкция дробилки позволяет вводить материал через несколько загрузочных патрубков, тем самым обеспечивая равномерную загрузку рабочей камеры. При этом наблюдается неравномерный износ молотков (по высоте сверху вниз он более интенсивный), что приводит к разбалансировке ротора и ухудшению выравниваемости гранулометрического состава дерти.

Наличие решет определяет степень измельчения и гранулометрический состав продуктов. Молотковые дробилки подразделяются на решетные и безрешетные. Роль решета в решетных молотковых дробилках

в процессе измельчения зерна немаловажна, что обусловило создание решет с отверстиями различной формы: круглой, прямоугольной и чешуйчатой. От пропускной способности решета зависит производительность и энергетические затраты на измельчение. Пропускная способность решета напрямую зависит от размера отверстий и определяется коэффициентом живого сечения, с ростом которого от 0,3 до 0,55 удельные энергетические затраты уменьшаются на 12–20 %, при этом наблюдается увеличение числа целых зерен и крупных частиц.

У зернодробилок закрытого типа угол охвата ротора решетом составляет $120\text{--}360^\circ$ и лимитируется в основном способом подачи материала в камеру дробилки. При угле охвата ротора в 360° создаются наилучшие условия для эвакуации измельченного материала. Кроме пропускной способности, решето непосредственно участвует в процессе измельчения кромками своих отверстий, оказывая скалывающее воздействие на частицы материала. Износ решета негативно влияет на расход энергии и ухудшает качество готового продукта.

Безрешетные молотковые дробилки выпускаются в небольшом ассортименте. Это объясняется тем, что дерть, получаемая при измельчении зерна на таких дробилках, имеет остаток на сите с диаметром отверстий 3–5 мм до 30 %. Принцип действия безрешетных дробилок строится на разрыве воздушно-продуктового слоя и выведении продуктов дробления из зоны работы молотков и дек в разделительную камеру или решетное сепарирующее устройство (в случае конструкции безрешетной дробилки с сепарацией). В случае конструкции безрешетных дробилок без сепарации материал выводится из рабочей камеры, не создавая замкнутый воздушно-продуктовый слой.

В молотковых дробилках сельскохозяйственного назначения возможна установка гладких, рифленых и зубовых дек. Дека в рабочей камере дробилки способствует торможению и более интенсивному измельчению частиц продукта. Применение деки эффективно только в случае радиальной подачи зерна и не играет особой роли при центральной загрузке.

Количество дисков для крепления рабочих органов зависит от конструктивных размеров рабочей камеры дробилки и подразделяется на одно и много-дисковые. Расположение шарнирно закрепленных молотков на роторе варьируется. Они крепятся по длине окружности ротора либо рядами без смещения, либо по винтовой линии, но обязательно должны перекрывать всю ширину дробильной камеры. Каждый отдельный ряд молотков входит в контакт с частицами вновь поступающего продукта лишь один раз за один оборот ротора. Таким образом, количество дисков, применяемых для крепления молотков, непосредственно влияет на производительность молотковой дробилки. Из-за конструктивных особенностей пневматические дробилки, а именно установки вентилятора за молотковым ротором, имеют однодисковое исполнение.

С механической подачей таких ограничений не возникает, потому что они могут быть выполнены с многодисковым креплением молотков.

Отвод материала после измельчения может быть осуществлен:

- самотеком;
- принудительно транспортером в зашпелетном пространстве или в разделительной камере;
- воздушным потоком вентилятора, который может быть конструктивно совмещен с корпусом дробилки, установленным на валу или обособленно с фронтальным или торцевым расположением;
- воздушным потоком ротора дробилки с незамкнутым и замкнутым воздушными циклами;
- лопатками вентилятора, которые интегрируют с дробильным ротором.

Недостаток замкнутого воздушного цикла заключается в том, что попадание части пылевой фракции с воздушным потоком приводит к дополнительной нагрузке на дробильный ротор.

При механическом транспортировании готового продукта из дробилки наблюдается большой перепад давления, что приводит к переизмельчению и снижению производительности дробилки на 15–20 %.

В конструкциях, оснащенных вентилятором, отвод измельченного продукта до смесителя пневмотранспортом возможен в циклон с шлюзовым затвором, что влечет потери давления и, как следствие, переизмельчение продукта из-за несвоевременной эвакуации. При пневмотранспортировании непосредственно в смеситель без циклона образуется большое количество пыли.

Представленный анализ классификации молотковых дробилок показывает стремление разработчиков и производителей повысить технико-экономические характеристики дробилки при сохранении технологических параметров выравнивания гранулометрического состава измельченного материала и уменьшении пылевой фракции до минимума, соответствии полученного дробленого продукта зоотехническим требованиям, снижении энергоемкости процесса.

На рынке молотковые дробилки представлены российскими и зарубежными компаниями, выделим по производительности группы до 1, 1–3, 3–5, 5–10, более 10 т. Каждая группа применяется в хозяйствах в зависимости от поголовья животных. Группа до 1 т применяется на малых фермах и личных подсобных хозяйствах, группы 1–3 и 3–5 т – на средних и крупных животноводческих предприятиях как отдельная единица оборудования или в составе поточно-технологической линии комбикормового завода, группы 5–10 и более 10 т – на специализированных комбикормовых предприятиях.

Несмотря на широкое разнообразие конструктивных элементов молотковых дробилок, можно выделить объединяющую характеристику, на основании которой подразделить молотковые дробилки на механические и пневматические зернодробилки в группах с про-

изводительностью до 1, 1–3, 3–5, а группы 5–10 и более 10 т выпускаются только в механическом исполнении, исходя из этого подхода составлена таблица 3.

Рассчитанные технико-экономические показатели удельной металлоемкости и удельных энергозатрат характеризуют совершенство конструкции и технологической схемы, эффективность работы выпускаемых зернодробилок. Расчеты проводились без приведения к нормальным условиям и без учета качественных характеристик процесса измельчения. Данные показатели позволяют обоснованно подойти к выбору и покупке молотковой дробилки. Энергетический анализ наиболее распространенных молотковых зернодробилок российского и зарубежного производства (табл. 3) проведен с использованием характеристик, заявленных заводами изготовителями, а деление рассмотренных зернодробилок на условные энергетические классы выполнено по значениям их производительности.

Наилучшие показатели удельной металлоемкости и удельных энергозатрат у зернодробилок производительностью:

- до 1 т механических Ставмаш К-3 и Comfort-MK – 0,09 ($t_m \times \text{ч}$)/т, SanYuan 9FP-20C – 7,5 ($\text{кВт} \times \text{ч}$)/т, пневматических ЗДП-1 – 0,18 ($t_m \times \text{ч}$)/т, ДКР-0,9 – 8,3 ($\text{кВт} \times \text{ч}$)/т;
- 1–3 т механических ДМБ-1,1 – 0,07 ($t_m \times \text{ч}$)/т и Кубанец-1200 – 4,6 ($\text{кВт} \times \text{ч}$)/т, пневматических ДПЗ-22 – 0,09 ($t_m \times \text{ч}$)/т, ДМП-22, ДМПД-22 и ДПЗ-22 – 7,3 ($\text{кВт} \times \text{ч}$)/т;
- 3–5 т механических Molot-3000 – 0,09 ($t_m \times \text{ч}$)/т и 3,7 ($\text{кВт} \times \text{ч}$)/т, пневматических ДВР-37 – 0,08 ($t_m \times \text{ч}$)/т, ДКР-4Д-Ф – 7,3 ($\text{кВт} \times \text{ч}$)/т;
- 5–10 т механических ДМ-45, SFSP68*108 и VHM 115*40 – 0,11 ($t_m \times \text{ч}$)/т, ДМ-37 – 5,3 ($\text{кВт} \times \text{ч}$)/т;
- более 10 т механической ДМ-55 – 0,03 ($t_m \times \text{ч}$)/т и 4,8 ($\text{кВт} \times \text{ч}$)/т.

На основании данных о молотковых дробилках из открытых источников рассчитан комплексный показатель совершенства зернодробилок (K_n). Его значение находится в диапазоне 0,1–2,22 ($\text{кВт} \times \text{ч} \times t_m$)/т. Таким образом, более эффективными являются дробилки с наименьшим значением комплексного показателя эффективности у зернодробилок производительностью:

- до 1 т механической Comfort-MK – 0,74 ($\text{кВт} \times \text{ч} \times t_m$)/т, пневматической ДЗМ-0,8 – 1,13 ($\text{кВт} \times \text{ч} \times t_m$)/т;
- 1–3 т механической ДМБ-1,1 – 0,35 ($\text{кВт} \times \text{ч} \times t_m$)/т, пневматической ДМП-22 – 0,77 ($\text{кВт} \times \text{ч} \times t_m$)/т;
- 3–5 т механической Molot-3000 – 0,33 ($\text{кВт} \times \text{ч} \times t_m$)/т, пневматической ДКМП-3,0 – 3,30 ($\text{кВт} \times \text{ч} \times t_m$)/т;
- 5–10 т механической SFSP 68*108 – 0,91 ($\text{кВт} \times \text{ч} \times t_m$)/т;
- более 10 т механической ДМ-55 – 0,14 ($\text{кВт} \times \text{ч} \times t_m$)/т.

С целью получения зависимости потребляемой энергии и удельных энергозатрат молотковых дробилок от их производительности смежные условные энергетические классы были объединены графическим методом в две укрупненные группы:

1-я группа – мало- и средне производительные со значением $Q = 0,1\text{--}5$ т/ч;

2-я группа – высокопроизводительные $Q > 5$ т/ч.

Таблица 3. Техничко-энергетические показатели молотковых зернодробилок

Table 3. Technical and energy indicators of hammer grain crushers

Название	Страна производитель	Q , т/ч	E , кВт×ч	$E_{уд}$, (кВт×ч)/т	m , т _м	$m_{уд}$, (т _м ×ч)/т	K_p , (кВт×ч×т _м)/т
Механические малогабаритные зернодробилки (до 1 т)							
Ставмаш К-3	Россия	0,20	1,9	9,5	0,018	0,09	0,85
Зубр-2	Россия	0,24	2,5	10,4	0,022	0,11	1,37
Comfort-MK	Китай	0,25	2,5	10,0	0,018	0,09	0,74
Donny-3500	Украина	0,30	2,5	8,3	0,062	0,20	1,66
Спектр-3НП	Россия	0,30	3,0	10,0	0,065	0,21	2,10
SanYuan 9FP-20C	Китай	0,40	3,0	7,5	0,067	0,16	1,20
Пневматические малогабаритные зернодробилки (до 1 т)							
Ур-2,2	Россия	0,20	2,2	9,1	0,040	0,20	1,46
ДВР-7,5	Россия	0,80	7,5	9,4	0,180	0,22	2,06
ДЗМ-0,8	Украина	0,80	7,5	9,4	0,150	0,19	1,13
ДКР-0,9	Россия	0,90	7,5	8,3	0,180	0,20	1,35
М-ROL-11	Польша	1,00	11,0	11,0	0,200	0,20	1,20
ЗДП-1	Россия	1,00	11,0	11,0	0,180	0,18	1,98
Механические зернодробилки для малых фермерских хозяйств (1–3 т)							
ДМБ-1,1	Россия	1,10	5,5	5,0	0,082	0,07	0,35
Molot-1000	Россия	1,10	7,5	6,8	0,110	0,13	0,51
Кубанец-1200	Россия	1,20	5,5	4,6	0,120	0,10	0,46
РОМ-Aug.H-115	Польша	1,20	7,5	6,3	0,155	0,12	0,76
VNM 45*37	Турция	2,00	18,5	9,2	0,480	0,24	2,22
ДМР-15	Россия	3,00	15,5	5,2	0,600	0,20	1,04
Пневматические зернодробилки для малых фермерских хозяйств (1–3 т)							
ДКМП-1,6	Беларусь	1,60	15,0	9,4	0,320	0,20	1,88
ЗДП-2	Россия	2,00	18,5	9,3	0,300	0,15	1,39
М-ROL-11	Польша	2,50	22,0	8,8	0,400	0,16	1,41
ДМП-22	Россия	3,00	22,0	7,3	0,315	0,11	0,77
ДМПД-22	Россия	3,00	22,0	7,3	0,355	0,12	0,87
ДПЗ-22	Россия	3,00	22,0	7,3	0,270	0,09	0,65
Механические средне-производительные зернодробилки (3–5 т)							
Molot-3000	Россия	3,00	11,0	3,7	0,270	0,09	0,33
ДМ-15	Россия	3,90	15,0	3,8	0,535	0,13	0,49
ДМ-18	Россия	4,30	18,5	4,3	0,590	0,13	0,55
ДМР-18,5(22,5)	Россия	4,50 (5,00)	18,5 (22,5)	3,7	0,667	0,13	0,48
ДМ-22	Россия	5,00	22,5	4,5	0,723	0,14	0,63
VNM 70*40	Турция	5,00	37,0	7,4	1,040	0,20	1,48
Пневматические средне-производительные зернодробилки (3–5 т)							
ДКР-4Д-Ф	Россия	3,00	22,0	7,3	0,520	0,14	0,88
ДКМП-3,0	Беларусь	3,30	30,0	9,1	0,320	0,11	0,10
ДПМ-30	Россия	3,50	30,0	8,6	0,350	0,10	0,86
ДКМП-3,7	Беларусь	3,60	37,0	10,3	0,455	0,12	1,24
ДВР-37	Россия	4,50	37,0	8,2	0,345	0,08	0,66
ДПЗД-37	Беларусь	5,00	37,0	7,4	0,450	0,09	0,67
Механические высокопроизводительные зернодробилки (5–10 т)							
VNM 70*40	Турция	6,00	45,0	7,5	1,055	0,17	1,27
ДЗМ-6	Украина	6,00	37,0	6,2	1,260	0,21	1,30
ДМ-37	Россия	7,00	37,0	5,3	1,210	0,17	0,92
ДМ-45	Россия	8,00	45,0	5,6	1,110	0,11	1,10
SFSP68*108	Китай	9,00	75,0	8,3	0,940	0,11	0,91
VNM 115*40	Турция	10,00	75,0	7,5	2,160	0,21	1,57
Механические промышленные зернодробилки (более 10 т)							
ДМ-55	Россия	11,50	55,0	4,8	0,395	0,03	0,14
ДЗМ-12	Украина	12,00	75,0	6,3	1,950	0,16	1,00
VNM 115*40	Турция	12,00	90,0	7,5	2,190	0,18	1,35
ЕМ-110	Польша	14,00	110,0	7,9	2,300	0,16	1,26
VNM 115*60	Турция	20,00	132,0	6,6	2,400	0,12	0,79
VNM 115*70	Турция	25,00	160,0	6,4	2,925	0,12	0,76

Для улучшения визуализации сравнительного анализа полученных зависимостей дробилок различных энергетических групп их графическое изображение представлено в системе координат, где оси абсцисс и ординат имеют двойные значения (рис. 1).

Сравнительный анализ пневматических и классических дробилок у первой группы показал повышенный расход потребляемой энергии на выполнение технологического процесса, а также относительные ограничения по производительности (максимальное значение $Q = 5$ т/ч), что, в свою очередь, сужает сферу их применения. Высокопроизводительные и промышленные зернодробилки, также как и малопроизводительные, имеют линейную зависимость затрачиваемой энергии от производительности (E от Q) и ограничиваются максимальными показателями $E = 160$ кВт×ч и $Q = 25$ т/ч.

Зависимость удельных энергозатрат от производительности у механических дробилок классической компоновки имеет гиперболический характер. Так, значения $E_{уд}$ малогабаритных молотковых измельчителей находятся в диапазоне 6–10,5 кВт×ч/т, а для всех остальных энергетических групп составляет 4–6 кВт×ч/т.

Пневматические зернодробилки характеризуются более нестабильным характером распределения удельных энергозатрат и имеют линейную зависимость от производительности. При этом среднее значение $E_{уд.ср.}$

превышает значение удельных энергозатрат механических зернодробилок классических схем и составляет 8–10 кВт×ч/т.

Повышенные удельные энергозатраты пневматических зернодробилок связаны с тем, что количественные значения потребляемой энергии заявлены с учетом ее расхода на транспортировку исходного материала, подвергающегося измельчению, и на вывод готовой продукции, т. е. на работу пневмотранспорта. При рассмотрении механических зернодробилок затраты на транспортировку не учитывались.

Значения комплексного показателя совершенствования конструкции молотковой дробилки ($K_{п.}$), производительности и удельных энергетических показателей являются разнопорядковыми элементами, которые необходимо одновременно учитывать при их приобретении. Для наглядности и облегчения выбора зернодробилок предлагается использовать графическое представление данных показателей эффективности (рис. 2).

Анализ усредненных энергетических показателей, в том числе и $K_{п.}$, показал снижение их значений на 20 % в случае применения механических дробилок, в сравнении с пневматическими, что частично объясняется необходимостью дополнительных энергозатрат на подачу исходного технологического материала и отвода

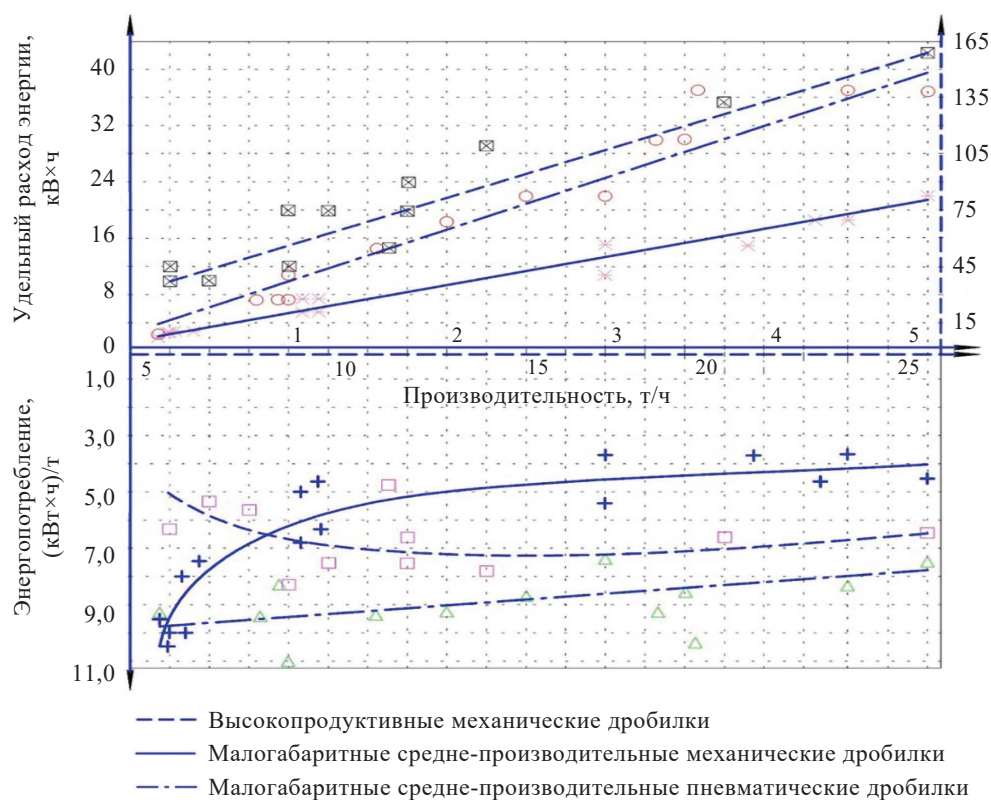


Рисунок 1. Зависимость энергопотребления и удельного расхода энергии молотковых дробилок от их производительности

Figure 1. Effect of energy consumption and specific energy consumption on the productivity of hammer crushers



- 1 – Механические малогабаритные дробилки; 5 – Механические средне-производительные дробилки;
 2 – Пневматические малогабаритные дробилки; 6 – Пневматические средне-производительные дробилки;
 3 – Механические дробилки для малых фермерских хозяйств; 7 – Механические высокопроизводительные дробилки;
 4 – Пневматические дробилки для малых фермерских хозяйств; 8 – Механические промышленные дробилки.

Рисунок 2. Диаграмма усредненных энергетических показателей

Figure 2. Mean energy indicators

готовой продукции от выгрузного окна либо накопительного бункера классических дробилок.

При рассмотрении организации процесса приготовления комбинированных кормов в предприятиях, специализирующихся на производстве продукции животноводства, в настоящее время все чаще наблюдается тенденция перехода на собственное производство. Так, процесс производства осуществляется с помощью малогабаритных и средне-производительных комбикормовых агрегатов, что позволяет не только максимально использовать собственную кормовую базу, ресурсы местных товаропроизводителей, но и значительно снизить транспортные расходы. При этом ниша потребителя, использующего готовые комбикорма со специализированных предприятий, где производительность зернодробилок достигает 10 т/ч и более, остается заполнена на достаточно высоком уровне. В связи с этим производители зернодробилок представляют на рынке большой их спектр, имеющий широкий вариативный диапазон конструктивных схем [12, 13].

Целый ряд современных исследований, изучающих процесс измельчения зерна, выделяет одним из основных недостатков высокий удельный расход электроэнергии 6–15 кВт×ч на 1 т зерна [14–18].

Частичное устранение указанных недостатков возможно за счет своевременного вывода готовой продукции из рабочей камеры путем выравнивания и регулирования в ней воздушно-продуктового слоя, образующегося вследствие совмещения воздушного потока с продуктами измельчения и многократной их циркуляции внутри рабочей камеры дробилки. При этом многие исследователи отмечали неравномерность воздушно-продуктового слоя как в продольном, так и в диаметральном направлении. Замкнутый воздушный поток

действует на всех этапах рабочего цикла: способствует подаче исходного материала в рабочую камеру; обеспечивает движение материала в дробильной камере; способствует измельчению и выносу готового продукта через отверстия решета (для решетчатых дробилок).

Выводы

Составлена классификация молотковых дробилок: по виду рабочей камеры, количеству стадий измельчения, способу подачи материала, виду ввода материала, ориентации вала ротора, наличию решет, наличию деки, количеству дисков, способу отвода материала.

Полученные результаты исследования указывают на возможные направления совершенствования конструкций молотковых дробилок:

1. Совершенствование организации применения воздушного потока в пневматических молотковых дробилках.

2. Своевременный вывод из камеры дробления измельчаемого продукта.

3. Увеличение эффективности измельчения молотковым ротором с уменьшением энергозатрат.

Составлена таблица, в которой представлены наиболее полные на сегодняшний день сведения о технико-экономических показателях молотковых дробилок, позволяющая разделить их по производительности и выделить дробилки с наилучшими показателями. Предложено ввести комплексный показатель совершенства конструкции молотковой дробилки, позволяющий упростить выбор дробилки потребителям. Для его расчета используется произведение удельных энергозатрат и удельной металлоемкости. Наиболее эффективными являются дробилки с наименьшим значением комплексного показателя эффективности.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат.

Contribution

The authors participated equally in the writing of the manuscript and are equally responsible for any potential plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declared no conflict of interests regarding the publication of this article.

Список литературы / References

1. Sabiev UK, Soyunov AS, Myalo VV, Yatsunov AN. Theoretical description of the motion of a material particle in pan vibrating batchers for agricultural purposes. IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci. 2022;954:012067. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/954/1/012067>
2. Brodziak A, Król J, Nowaczek A. Naturalne substancje pochodzenia roślinnego negatywnie oddziałujące na zdrowie krów oraz jakość mleka. Żywnosc. Nauka. Technologia. Jakość. 2017;24(1):33–47. [Brodziak A, Król J, Nowaczek A. Natural substances of plant origin adversely affecting health of cows and milk quality. Food. Science Technology. Quality. 2017; 24(1):33–47. (In Polish)] <https://doi.org/10.15193/zntj/2017/110/171>
3. Vaculík P, Maloun J, Chládek L, Přikryl M. Disintegration process in disc crushers. Research in Agricultural Engineering. 2013;59(3):98–104. <https://doi.org/10.17221/28/2012-RAE>
4. Sysuev V, Savinyh P, Aleshkin A, Ivanovs S. Simulation of elastic deformation propagation of grain under impact crushing in crusher. Proceedings of the 15th Intern. Sci. Conf. Jelgava, 2016;15:1065–1071. <https://elibrary.ru/WPFONF>
5. Dal-Pastro F, Facco P, Bezzi F, Zamproga E, Barolo M. Data-driven modelling of milling and sieving operations in a wheat milling process. Food and Bioproducts Processing. 2016;99:99–108. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.04.007>
6. Bayram M, Öner MD. Bulgur milling using roller, double disc and vertical disc mills. Journal of Food Engineering. 2007;79(1):181–187. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.042>
7. Savinyh P, Isupov A, Ivanov I, Ivanovs S. Research in centrifugal rotary grinder of forage grain. Proceedings of the 20th Intern. Sci. Conf. Jelgava, 2021;20:205–211. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF044>
8. Volkonov M, Abalikhin A, Krupin A, Maksimov I. Studying the operational efficiency of the centrifugal-impact feed grain crusher of the new design. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020;5(1):44–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212994>
9. Sukhoparov A, Papushin E, Ivanov I, Plotnikova Y. Rotary-centrifugal shredder for forage preparation. E3S Web of Conferences. 2020;222:01020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022201020>
10. Astanukulov KD, Fozilov GG, Kurbanov NM, Adashev BSh, Boyturayev SA. Grinding of the grains according to parameters of hummers in double-staged grinder-crusher. IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci. 2020;614:012129. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012129>
11. Savinyh P, Nechaev V, Nechaeva M, Ivanovs S. Motion of grain particle along blade of rotor fan of hammer crusher. Proceedings of the 15th Intern. Sci. Conf. Jelgava, 2016;15:1072–1076. <https://elibrary.ru/WPGECF>
12. Savinyh P, Shirobokov V, Fedorov O, Ivanovs S. Influence of rotary grain crusher parameters on quality of finished product. Proceedings of the 17th Intern. Sci. Conf. Jelgava, 2018;17:131–136. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N158>
13. Iskenderov R, Lebedev A, Zacharin A, Lebedev P. Evaluating effectiveness of grinding process grain materials. Proceedings of the 17th Intern. Sci. Conf. Jelgava, 2018;17:102–108. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N147>
14. Savinyh P, Kazakov V, Moshonkin A, Ivanovs S. Investigations in feeding device of grain crusher. Proceedings of the 18th Intern. Sci. Conf. Jelgava, 2019;18:123–128. <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N165>
15. Yalpathyk E, Budenko S. Balance of power and energy efficiency grain crusher. Praci Tavria State Agrotechnological University. 2013;13(1):218–226.
16. Yalpathik O. Ground of parameters and operation modes grain-growing crusher of direct blow. Praci Tavria State Agrotechnological University. 2013;13(7):42–56.
17. Gvozdev A, Yalpathik A. Experimental researches of distribution of grain on chamber of crushing of crusher with vertical rotor. Praci Tavria State Agrotechnological University. 2012;(12)3:102–108.
18. Thomas M, Hendriks WH, van der Poel AFB. Size distribution analysis of wheat, maize and soybeans and energy efficiency using different methods for coarse grinding. Animal Feed Science and Technology. 2018;240:11–21. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.03.010>