

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.121-138>

EDN: <https://elibrary.ru/owtife>

УДК 621.927

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<https://vestnik.mrsu.ru>

Оригинальная статья / Original article



Оптимизация параметров универсальной установки для измельчения кормов

З. В. Кулиев , **К. Г. Якубов**, **Э. М. Алиев**

*Азербайджанский государственный аграрный университет
(г. Гянджа, Азербайджан)*

 vaqifizz@gmail.com

Аннотация

Введение. Разнообразие кормовой базы и поголовья скота в фермерских хозяйствах требует множества различных технологических линий и технических средств для приготовления кормов. Чаще всего такие технические средства имеют высокую стоимость, что делает их использование экономически нецелесообразным. Таким образом, создание малогабаритных технических средств для механизации основных процессов кормоприготовления в фермерских хозяйствах является актуальной задачей.

Цель исследования. Изучить основные конструктивно-технологические факторы, влияющие на рабочий процесс измельчения кормов молотково-сегментным режущим рабочим органом с более эффективными показателями энергоемкости процесса.

Материалы и методы. Объектом исследования является экспериментальная установка универсального измельчителя с комбинированным молотково-сегментным режущим рабочим органом. В ходе исследования были установлены критерии оптимизации и определены ключевые факторы, влияющие на процесс измельчения. Исследовалось влияние ключевых факторов частоты вращения ротора и подачи сырья в измельчающую камеру на критерии оптимизации энергопотребления и качество процесса измельчения. В процессе экспериментов частота вращения ротора регулировалась изменением частоты питающего напряжения, подача сырья определенной массы проводилась через каждый определенный промежуток времени, качество измельчения определялось гранулометрическим составом и средневзвешенной длиной частиц кормов. Энергоемкость процесса измельчения установили с помощью измерителя мощности переменного тока. С целью построения математической модели был использован центральный композиционный рототабельный план второго порядка для двух факторов.

Результаты исследования. Выявили оптимальные сочетания параметров, которые позволяют эффективно измельчать корм в соответствии с зоотехническими требованиями, обеспечивая минимальную энергоемкость рабочего процесса. Установили критерии оптимизации и определили ключевые конструктивно-технологические факторы, влияющие на процесс измельчения.

Обсуждение и заключение. Основным фактором воздействия на энергоемкость процесса измельчения является подача кормов в камеру измельчения, а основная причина увеличения энергоемкости процесса – рост силы резания в каждом сегменте рабочего органа в отдельности, вследствие повышения за каждую единицу времени плотности корма, проходящего через рабочий орган измельчителя. Полученные в ходе экспериментальных исследований данные позволяют оптимизировать рабочий процесс разработанной универсальной установки для измельчения кормов при кормлении крупного рогатого скота в фермерских животноводческих хозяйствах.

© Кулиев З. В., Якубов К. Г., Алиев Э. М., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: грубые корма, зерновые корма, корнеклубнеплоды, процесс измельчения, энергемкость процесса, камера измельчения, измельчающий орган

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кулиев З.В., Якубов К.Г., Алиев Э.М. Оптимизация параметров универсальной установки для измельчения кормов. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(1):121–138. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.121-138>

Optimizing the Parameters of a Universal Unit for Fodder Grinding

Z. V. Quliyev , K. G. Yaqubov, E. M. Aliev
Azerbaijan State Agrarian University
(Ganja, Azerbaijan)

 vaqifizz@gmail.com

Abstract

Introduction. The diversity of the fodder base and livestock in farming enterprises requires various processing lines and technological tools for fodder preparation. Most commonly, a high cost of these technological tools makes their use economically unfeasible. Therefore, an urgent task is to create compact technological tools for mechanizing the main processes of fodder preparation in farming enterprises.

Aim of the Study. The study is aimed at investigating the main structural-and-technological factors affecting the fodder grinding by a hammer-segment grinding tool with more efficient energy consumption indicators.

Materials and Methods. The subject of the study is an experimental setup of a universal grinder with a combined hammer-segment grinding tool. During the study, optimization criteria were found and key factors influencing the grinding process were identified. There was investigated the influence of key factors, such as the rotor rotation speed and the rate of raw material feeding into the grinding chamber, on such optimization criteria as energy consumption and grinding process quality. The experimental studies were analyzed to determine the optimal combination of parameters. During the experiments, the rotor rotation speed was adjusted through changing the supply voltage frequency and the feeding of raw material of a specific mass was carried out at regular intervals. The quality of grinding was determined by the granulometric composition and the average length of the fodder particles, while the energy consumption of the grinding process was measured using an alternating current power meter. To construct a mathematical model, there was used a central composite rotatable design of the second order for two factors.

Results. Based on the obtained data, there have been identified optimal parameter combinations for effective fodder grinding in accordance with zootechnical requirements and at minimal energy consumption for the grinding process.

Discussion and Conclusion. The main factor affecting the energy consumption of the grinding process is the fodder supply into the grinding chamber. The primary reason for the increase in energy consumption is the increase in grinding force in each segment of the working tool caused by increasing the density of fodder passing through the grinding tool per each unit of time. The data obtained during the experimental study make it possible to optimize the working process of the developed universal grinder for fodder grinding to feed cattle in livestock farms.

Keywords: coarse feeds, grain feeds, root and tuber crops, grinding process, energy consumption of the process, grinding chamber, grinding tool

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Quliyev Z.V., Yaqubov K.G., Aliev E.M. Optimizing the Parameters of a Universal Unit for Fodder Grinding. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(1):121–138. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.121-138>

Введение. Эффективное и высокопроизводительное развитие животноводства зависит от полноценного и сбалансированного питания животных. Употребление животными кормов, богатых питательными веществами, улучшает процессы пищеварения и способствует увеличению продуктивности, позволяет достичь оптимальных результатов без увеличения кормовой базы и поголовья скота. Например, при таком подходе наблюдается повышение удоя молока на 5–9 % и прирост массы на 10–15 %, по сравнению с раздельным кормлением компонентами рациона¹.

Для увеличения продуктивности сельскохозяйственных животных необходимо, чтобы корма проходили качественную подготовку перед скармливанием. Корм должен быть тщательно сбалансирован по питательным веществам и измельчен в целях увеличения поверхностно активных частиц для того, чтобы полностью усваиваться организмом животных. В зависимости от назначения и условий содержания животных для выращивания и откорма молодняка используются различные виды кормов. В соответствии с технологией кормления животных в состав рационов включаются различные кормовые элементы. От качества подготовки кормовых смесей в значительной степени зависит повышение эффективности животноводства как отрасли, поскольку доля затрат на корма составляет 30–60 % от всех производственных затрат² [1].

Современный уровень развития крестьянских и фермерских хозяйств наряду с механизацией процесса приготовления кормовых смесей усложняют создание кормов благодаря большому количеству компонентов в их составе. Это приводит к значительному увеличению себестоимости как самих смесей, так и конечной продукции животноводства [2; 3]. Решением данной проблемы является минимизация количества компонентов в кормовых смесях за счет включения только богатых питательными веществами при соблюдении оптимальных пропорций [4–6].

Особенностью малых и средних фермерских хозяйств является необходимость работы с разнообразной кормовой базой, включающей различные виды кормовых культур, а также содержание разных видов сельскохозяйственных животных. Это требует применения множества специализированных технологических линий и технических средств для обработки и приготовления кормов. Однако высокая стоимость такого оборудования, а также значительные эксплуатационные и энергетические затраты делают его использование экономически нецелесообразным для небольших хозяйств [7; 8]. В связи с этим актуальной задачей становится разработка и внедрение малогабаритных и многофункциональных технических решений, способных механизировать основные процессы кормоприготовления (измельчение, смешивание, дозирование, гранулирование) [9–11].

Такие устройства должны быть адаптированы к специфике кормовой базы малых и средних фермерских хозяйств, обеспечивать высокое качество обработки кормов

¹ Рядчиков В. Г. Основы питания и кормления сельскохозяйственных животных : учебно-практическое пособие. Краснодар : КубГАУ, 2012. 328 с.; Калашников А. П. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных : справочное пособие. 3-е изд., перераб. и доп. / под ред. А. П. Калашникова, В. И. Фисинина, В. В. Щеглова, Н. И. Клейменова. М. 2003. 456 с.

² Kravchuk V. I., Lutsenko M. M., Mechta M. P. Progressive Technologies of Gathering, Preparing and Distributing Feeds. Scientific-Practical Textbook, 2008. 104 p.; Adgidzi D., Mu'azu A., Olorunsogo S. T., Shaiwoya E. L. Design Considerations of Mixerpelleting Machine for Processing Animal Feeds // School of Engineering and Engineering Technology : 7th Annual Engineering Conference (28 – 30 June 2006, Minna). FUT Minna, 2006.

и при этом быть экономически выгодными за счет снижения энергозатрат и минимизации использования ресурсов [12]. Разработка подобных технологий должна учитывать не только экономические, но и экологические аспекты, способствуя устойчивому развитию сельского хозяйства и снижению углеродного следа [13].

Важным направлением является создание универсальных устройств, которые могут выполнять несколько функций одновременно, что позволит сократить количество необходимого оборудования, снизить затраты на его приобретение и обслуживание, а также повысить эффективность производства кормов [14]. Кроме того, такие технические средства должны быть просты в эксплуатации и доступны для фермеров с ограниченными техническими знаниями, что особенно важно в условиях малых хозяйств [15].

Внедрение подобных решений не только повысит рентабельность фермерских хозяйств, но будет способствовать улучшению качества кормов, что напрямую повлияет на продуктивность животных и, как следствие, на экономическую устойчивость сельскохозяйственных предприятий [16].

Цель исследования – определить и оптимизировать наиболее значимые факторы измельчения зерновых, грубых кормов, а также корнеклубнеплодов с комбинированным молотково-сегментным режущим рабочим органом с целью поиска оптимальных сочетаний параметров, при которых будут готовиться корма более высокого качества и при этом с минимальным энергопотреблением.

Обзор литературы. Анализ существующих технических средств для механизации основных процессов кормоприготовления выявил проблемы, связанные с организационными, техническими и технологическими недостатками, которые приводят к низкой эффективности использования более металлоемких серийно выпускаемых машин. Это создает неблагоприятные условия для применения их в малых фермерских хозяйствах. Для устранения этих проблем и усовершенствования процесса приготовления кормов проводятся работы по созданию и разработке конструкций установок для измельчения кормов для малых и средних фермерских хозяйств.

С целью изучения процесса измельчения кормов растительного происхождения в Ульяновском государственном аграрном университете была разработана установка для измельчения различных видов кормов, основанная на принципе ударного механизма, обеспечивающая широкий диапазон скоростей резания. Для обеспечения необходимого угла скольжения режущий элемент (нож) оснащен регулируемой пластиной с фиксатором, что позволяет изменять угол скольжения в пределах от 0 до 70°. Было установлено, что при угле скольжения ножа в пределах 30–60° и скорости в пределах 2–10 м/с возможно снизить удельную работу измельчения кукурузных початков и стеблей, картофеля, кормовой свеклы и моркови на 25–37 %, кукурузных листьев – на 15 %, пшеничной соломы – на 3 % [17].

В Самарской государственной сельскохозяйственной академии разработан и изготовлен шнековый измельчитель, в котором гребни шнека разделены на несколько частей³. Каждая часть выполняет функции резания и перемещения перерабатываемого продукта. Для достижения степени измельчения 10–15 мм при производительности

³ Новиков В. В., Камышева О. А. Технология измельчения корнеклубнеплодов // Фундаментальные основы научно-технической и технологической модернизации АПК : материалы Всерос. науч.-практ. конф. (6 – 7 июня 2013 г., г. Уфа). Ч. 1. Уфа : Башкирский ГАУ, 2013. С. 247–253. URL: <https://clck.ru/3Gbepr> (дата обращения: 27.08.2024).

установки 1 341–2 537 кг/ч и оптимальной энергоемкости процесса 2,152–5,574 кВт были определены следующие оптимальные параметры: частота вращения ножевого вала – 30,0...61,4 мин⁻¹; шаг расположения ножей на ножевом валу – 120 мм; степень открытия выходного отверстия – 0,4...1,0; угол при вершине ножа – 30° [18; 19].

Для устранения таких недостатков, как высокая металлоемкость и энергоемкость, неравномерный размер частиц измельченного продукта, быстрое изнашивание рабочих органов и т. д., разработана конструкция роторно-центробежного измельчителя зерна. Основными рабочими органами установки являются коаксиально установленные два смежных диска: верхний неподвижный диск, на рабочей поверхности которого установлены ножи ромбовидной формы с малыми углами резания по отношению к большим диагоналям, и нижний подвижный диск с кольцевыми выступами на рабочей поверхности. Внешний ряд ножей образует разделяющую поверхность, благодаря чему изменение угла наклона ножей позволяет плавно регулировать степень измельчения материала. Для достижения процента частиц, не превышающих 3 мм, до 95 % и снижения потребляемой энергии до 2,59 кВт были определены оптимальные параметры, которые указаны в таблице 1 [20].

Т а б л и ц а 1

Table 1

Оптимальные конструктивно-режимные параметры

Optimal design and operating parameters

Наименование параметра / Name of the parameter	Значение / Meaning
Скорость подачи материала, кг·с ⁻¹ / Material feed rate, kg·s ⁻¹	0,038
Частота вращения нижнего диска, мин ⁻¹ / Lower disk rotation frequency, min ⁻¹	1 200
Отверстие разделительной поверхности, мм / Dividing surface opening, mm	3,200
Количество ножей на первой ступени верхнего диска / Number of knives on the first stage of the upper disk	6
Количество ножей на второй ступени верхнего диска / Number of knives on the second stage of the upper disk	9

По результатам экспериментов установлено, что количество ножей и зазор, разделяющий поверхности, являются одними из самых важных факторов, влияющих на энергопотребление и качество получаемого продукта.

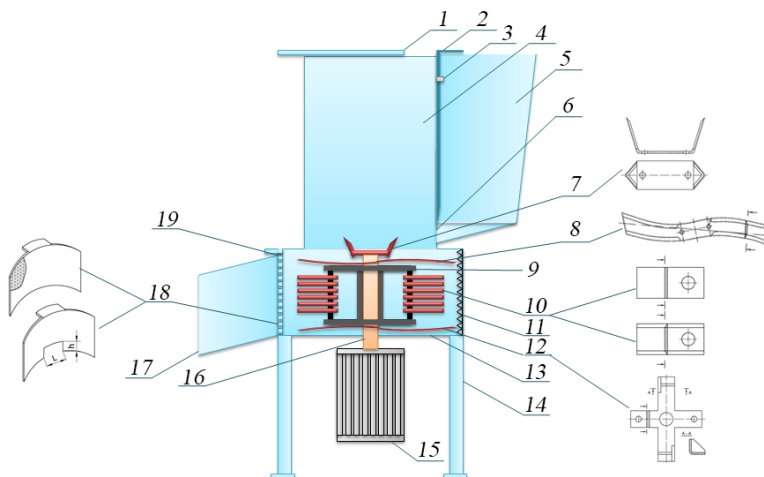
В Верхневолжском государственном агробиотехнологическом университете разработан центробежный измельчитель фуражного зерна, состоящий из корпуса рабочей камеры, бункера с регулировочной заслонкой, ротора с лопатками, решета и деки с отбойниками. С целью определения оптимальных параметров установки для повышения качества размола и снижения энергоемкости процесса проведены экспериментальные исследования. По результатам экспериментальных данных получены различные значения удельного расхода при следующих параметрах решет с отверстиями (d), площади выпускного окна бункера (F) и частоте вращения ротора (n): $W = 31,687$ кДж/кг; $d = 0,004$ м; $n = 3\,500$ мин⁻¹; $F = 0,001458$ м²; $W = 14,432$ кДж/кг; $d = 0,006$ м; $n = 3\,500$ мин⁻¹; $F = 0,001458$ м²; $W = 12,201$ кДж/кг; $d = 0,008$ м; $n = 3\,500$ мин⁻¹; $F = 0,001458$ м².

Наилучшие значения удельного расхода энергии получены при максимальных значениях всех трех параметров, то есть в третьем случае. При этом средний размер частиц составил $d_{\text{ср}} = 2,42$ мм, а содержание пылевидной фракции 3,02 % [21; 22].

Таким образом, совершенствование установок механической обработки кормов является актуальной задачей. Решение данной проблемы способствует как повышению усвоения кормов животными, так и улучшению качества продукции животноводства. Также более совершенные конструкции способствуют снижению энергозатрат на производство, что отражается на себестоимости продукта.

В качестве решения проблемы мы предлагаем конструктивно-технологическую схему универсального измельчителя с комбинированным молотково-сегментным режущим рабочим органом для измельчения, дробления и резки стебельчатых, зерновых и корнеклубнеплодных кормов [23].

Материалы и методы. Исследования проводились на разработанной нами экспериментальной установке универсального измельчителя кормов с комбинированным молотково-сегментным режущим рабочим органом, конструктивно-технологическая схема которой приведена на рисунке 1 [23].



Р и с. 1. Универсальный измельчитель кормов:

- 1 – крышка; 2 – регулировочный затвор; 3 – болт сжатия; 4 – цилиндрический бункер;
5 – конический бункер; 6 – проходное отверстие; 7 – сегментный U-образный нож;
8 – двухсторонний нож пропеллерного типа; 9 – ротор; 10 – набор подвижных молотков и ножей;
11 – дека; 12 – пластина, являющаяся одновременно вентилятором и измельчителем, имеющая ответвление в виде лопастей с косынкой на краях для обеспечения прочности;
13 – камера измельчения; 14 – рама; 15 – электрический двигатель; 16 – вал;
17 – выходной патрубок; 18 – набор сеток и пластина с окнами; 19 – выходное отверстие

F i g. 1. Universal feed grinder:

- 1 – lid; 2 – adjustment gate; 3 – compression bolt; 4 – cylindrical hopper;
5 – conical hopper; 6 – passage hole; 7 – segmental U-shaped knife; 8 – double-sided propeller-type knife;
9 – rotor; 10 – set of movable hammers and knives; 11 – breaker plate; 12 – plate, which also serves as a fan and grinder, with blade extensions reinforced with gussets for strength;
13 – grinding chamber; 14 – frame; 15 – electric motor; 16 – shaft; 17 – output pipe;
18 – set of sieves and plate with windows; 19 – discharge outlet

Источник: здесь и далее рисунки составлены авторами статьи.

Source: hereinafter in this article the diagrams are compiled by the authors.

Измельчающий механизм данного устройства включает в себя ротор 9, на котором расположены набор подвижных молотков и режущих ножей 10, двухсторонний пропеллерный нож 8, сегментный U-образный нож 7, а также пластину 12, выполняющую функции вентилятора и измельчителя.

Корма предварительно измельчаются двухсторонним ножом 8, затем они подходят к верхнему ряду набора подвижных молотков и режущих ножей 10, после удара о которые отбрасываются к расположенной на внутренней боковой поверхности рабочей камеры 13 деке 11 и перенаправляются к подвижным молоткам и режущим ножам следующего ряда, при этом корм разгружается от повторного воздействия на верхнем ряде. Таким образом, происходит полное измельчение во всех рядах набора молотков и режущих ножей. При измельчении тьюков происходит предварительное разрушение монолита и измельчение с целью исключения забиваний сегментным U-образным ножом 7. Измельченный корм поступает на пластину 12, выполняющую функции вентилятора и измельчителя, где после окончательного измельчения удаляется из устройства воздушным потоком.

В процессе эксперимента производилось измельчение зерновых (кукурузы с влажностью 8, 6 %, ячменя с влажностью 10, 1 %, пшеницы с влажностью 9, 7 %), грубых кормов (сено с влажностью 16 % и солома с влажностью 14 %), а также корнеклубнеплодов (кормовой свеклы с влажностью 86, 5 %, картофеля с влажностью 76, 8 % и моркови с влажностью 87 %). Размеры частиц измельченных масс соответствовали зоотехническим требованиям. Этот показатель составлял для грубых кормов 10...50 мм, для кормовой свеклы – 5,5...9,5 мм, для картофеля – 11,5...14,3 мм, для моркови – 5...10 мм, для зерновых – 1,0...2,0 мм. В общей массе влажность измельченных зерновых: кукурузы – 93, 5 %, ячменя – 98, 1 %, пшеницы – 98, 4 %.

Эксперименты и обработка данных проводились на основании общепринятых методик и методов⁴.

Результаты исследования. *Влияние факторов на энергоемкость процесса и определение их оптимальных показателей.* В качестве критерия оптимизации была принята удельная энергоемкость процесса измельчения кормов ($Y_N - N$), вы-

раженная в $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$. Анализ априорной информации и поисковых исследований показал, что наиболее значимыми явились следующие факторы: угловая скорость вращения ротора $\omega - X_1$ (рад/с) и подача корма в камеру измельчения $q - X_2$ (кг/с). Уровни варьирования факторов приведены в таблице 2.

Результаты эксперимента представлены в таблице 3: проведена обработка данных и построены математические модели.

⁴ Маслов Г. Г., Трубилин Е. И., Цыбулевский В. В. Моделирование в агроинженерии : учебное пособие для сельскохозяйственных ВУЗов. Краснодар : КубГАУ, 2019. 304 с. URL: <https://clck.ru/3GbefR> (дата обращения: 27.08.2024); Реброва И. А. Теория планирования эксперимента : учебное пособие. Омск : СибАДИ, 2016. 105 с.; ГОСТ Р 54783-2011. Испытания сельскохозяйственной техники. Основные положения [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3GbekT> (дата обращения: 27.08.2024).

Т а б л и ц а 2

Table 2

Факторы и уровни их варьирования
Factors and their levels of variation

Обозначение / Designation	$(\omega - X_1)$, рад/с / rad/s	$(q - X_2)$, кг/с / kg/s		
		x_{2r}	x_{2s}	x_{2k}
Нижний уровень (-) / Lower level (-)	169,6	0,05	0,075	0,100
Основной уровень (0) / Main level (0)	222,6	0,06	0,100	0,125
Верхний уровень (+) / Upper level (+)	275,6	0,07	0,125	0,150
Уровни вариации / Levels of variation	53	0,01	0,025	0,025

Т а б л и ц а 3

Table 3

Матрица плана эксперимента
The matrix of the experiment plan

№	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2	Y_N		
							Y_{N_r}	Y_{N_s}	Y_{N_k}
1	+	+	+	+	+	+	1,53	1,67	1,81
2	+	-	+	-	+	+	1,37	1,53	1,72
3	+	+	-	-	+	+	1,39	1,68	1,79
4	+	-	-	+	+	+	1,45	1,42	1,68
5	+	+1,414	0	0	+2	0	1,37	1,45	1,78
6	+	-1,414	0	0	+2	0	1,39	1,54	1,75
7	+	0	+1,414	0	0	+2	1,35	1,68	1,68
8	+	0	-1,414	0	0	+2	1,22	1,63	1,66
9	+	0	0	0	0	0	1,12	1,39	1,67
10	+	0	0	0	0	0	1,10	1,38	1,63
11	+	0	0	0	0	0	1,14	1,36	1,64
12	+	0	0	0	0	0	1,13	1,42	1,65
13	+	0	0	0	0	0	1,13	1,40	1,62
$\sum 13$							$\sum 16,69$	$\sum 19,55$	$\sum 22,08$

С целью обоснования оценки влияния факторов по результатам эксперимента рассчитаны уравнения регрессии второго порядка:

1) для энергоемкости процесса измельчения грубых кормов $(N - Y_{N_r})$, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$:

$$y_{N_r} = 1,124 + 0,08965x_1 + 0,0305x_2 + 0,055x_1x_2 + 0,154x_1^2 + 0,106x_2^2; \quad (1)$$

2) для энергоемкости процесса измельчения зерновых кормов $(N - Y_{N_s})$, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$:

$$y_{N_s} = 1,389 + 0,0341x_1 + 0,0213x_2 + 0,03x_1x_2 + 0,0575x_1^2 + 0,137x_2^2; \quad (2)$$

3) для энергоемкости процесса измельчения корнеклубнеплодов ($N - Y_{N_k}$), $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$:

$$y_{N_k} = 1,642 + 0,0303x_1 + 0,011x_2 + 0,005x_1x_2 + 0,0696x_1^2 + 0,0221x_2^2. \quad (3)$$

Значимость полученных результатов проверена по критерию Кохрена, а гипотезу адекватности проверяли с помощью критерия Фишера:

$$G_{pr} = 0,61 < G_T = 0,7679; G_{p3} = 0,59 < G_T = 0,7679; G_{pk} = 0,59 < G_T = 0,7679;$$

$$F_{pr} = 8,002 < F_T = 18,51; F_{p3} = 7,991 < F_T = 18,51; F_{p3} = 8 < F_T = 18,51.$$

После получения адекватных математических моделей процесса определялись координаты оптимума и изучались поверхности отклика.

Получены оптимальные значения факторов, при которых минимальное значение энергоемкости процесса измельчения составило для грубых кормов

$y_{N_r} = 1,110, \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$, для зерновых кормов $-y_{N_s} = 1,382, \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$, для корнеклубнеплодов $-y_{N_k} = 1,634, \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$. Оптимальные значения факторов приведены в таблице 4.

Т а б л и ц а 4

T a b l e 4

Оптимальные значения факторов
Optimal values of the factors

Виды кормов / Types of feed	Значение факторов / Importance of factors			
	$\omega - X_1, \text{ рад/с} / \text{ rad/s}$		$q - X_2, \text{ кг/с} / \text{ kg/s}$	
	Кодированное / Coded	Раскодированное / Decoded	Кодированное / Coded	Раскодированное / Decoded
Грубые корма / Coarse feeds	-0,278	$\omega = 207,87$	-0,0717	$q = 0,0593$
Зернистые корма / Granular feeds	-0,326	$\omega = 205,32$	-0,1130	$q = 0,0972$
Корнеклубнеплоды / Root and tuber crops	-0,227	$\omega = 210,57$	-0,2750	$q = 0,1180$

После получения соответствующей математической модели второго порядка и определения оптимальных координат центра отклика поверхности мы изучаем характеристики этой поверхности по ее окружности. Для этого переносим начало системы координат в центр фигуры системы координат $x_1 - x_2$. Перенос координатной системы параллельно центру фигуры приводит к исчезновению линейных членов в уравнениях (1)–(3), в это время коэффициенты других членов остаются неизменными, а показатели свободных переменных изменяются. В результате эти уравнения принимают следующий вид:

1) для энергоемкости процесса измельчения грубых кормов ($N - Y_{N_r}$), $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$:

$$y_{N_r} = 1,110 + 0,055x_1x_2 + 0,154x_1^2 + 0,106x_2^2; \quad (4)$$

2) для энергоемкости процесса измельчения зерновых кормов $(N - Y_{N_3})$, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$:

$$Y_{N_3} = 1,382 - 0,03x_1x_2 + 0,575x_1^2 + 0,137x_2^2; \quad (5)$$

3) для энергоемкости процесса измельчения корнеклубнеплодов $(N - Y_{N_k})$, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$:

$$Y_{N_k} = 1,634 - 0,005x_1x_2 + 0,0696x_1^2 + 0,0221x_2^2. \quad (6)$$

Чтобы исключить парное взаимодействие между факторами, начало системы координат перемещается в одну точку, в которой определяются угол поворота оси координат и коэффициенты регрессии в канонической форме. После этого уравнения (4)–(6) приводятся к канонической форме:

1) для энергоемкости процесса измельчения грубых кормов $(N - Y_{N_1})$, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$:

$$\alpha = 24^\circ 27'$$

$$Y - 1,110 = 0,099X_1^2 + 0,161X_2^2; \quad (7)$$

2) для энергоемкости процесса измельчения зерновых кормов $(N - Y_{N_3})$, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$:

$$\alpha = 10^\circ 21'$$

$$Y - 1,382 = 0,0821X_1^2 + 0,112X_2^2; \quad (8)$$

3) для энергоемкости процесса измельчения корнеклубнеплодов $(N - Y_{N_k})$, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$:

$$\alpha = -3^\circ$$

$$Y - 1,634 = 0,0679X_1^2 + 0,0237X_2^2. \quad (9)$$

Поскольку в уравнениях (7)–(9) коэффициенты при неизвестных членах имеют одинаковый знак, то они характеризуются как уравнения эллипса. При оптимальном влиянии факторов на процесс были построены поверхности откликов (Y_{N_1}) , (Y_{N_3}) , (Y_{N_k}) (рис. 2–4).

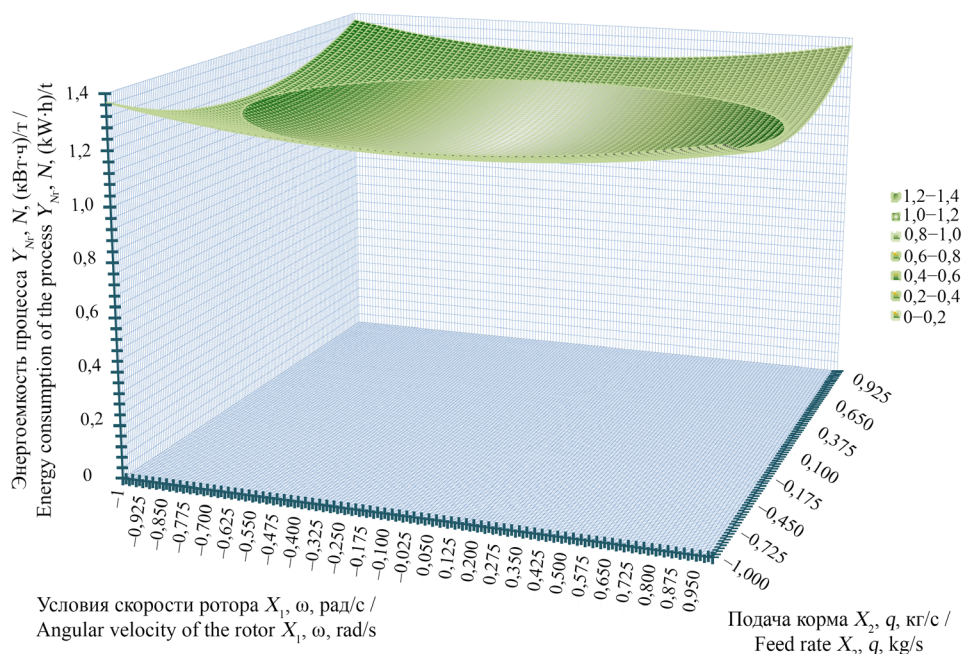
Таким образом, при измельчении грубых кормов (рис. 2) на энергоемкость наибольшее влияние оказывает подача кормов в камеру измельчения, имеющая нелинейный характер. Эффект от изменения частоты вращения ротора имеет постоянный линейный характер практически до основного уровня варьирования, а после этого, с увеличением частоты вращения, оно приобретает нелинейный характер.

Поверхность отклика, характеризующая влияние факторов на энергоемкость процесса измельчения зернистых кормов (рис. 3), имеет форму эллиптического параболоида. При этом влияние переменных факторов на энергоемкость почти одинаково, хотя относительно наибольшее влияние оказывает подача кормов в камеру измельчения.

Из графического изображения видно, что при измельчении корнеклубнеплодов возрастание энергоемкости процесса происходит одновременно с увеличением показателей обоих факторов (рис. 4). Следует также отметить и то, что влияние обоих факторов на энергоемкость процесса имеет нелинейную зависимость и параболоидную форму.

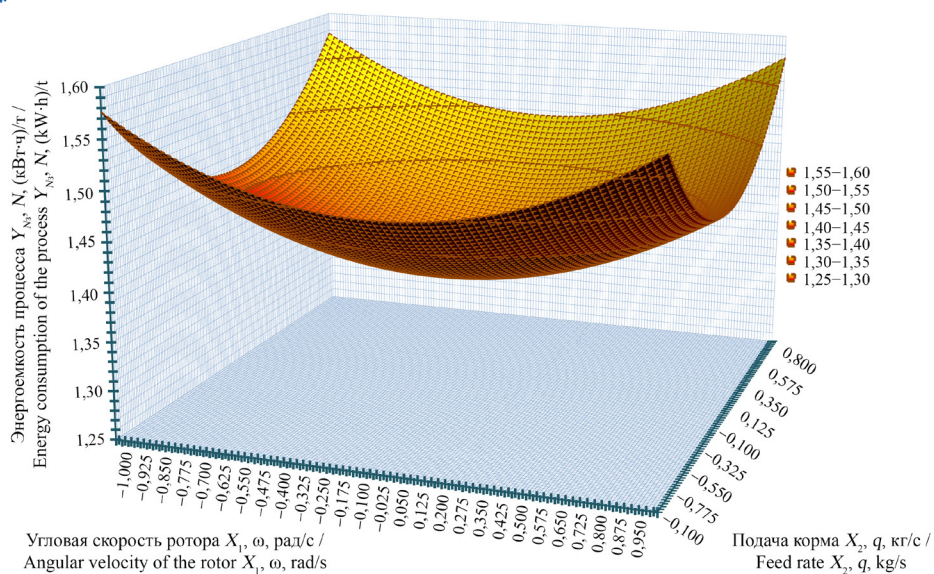
Главным фактором воздействия на энергоемкость процесса при измельчении всех видов кормов является подача кормов в камеру измельчения. Основной причиной увеличения энергоемкости процесса является возрастание силы резания в каждом сегменте рабочего органа в отдельности из-за увеличения за каждую единицу времени плотности проходящих через рабочий орган измельчителя кормов.

Поверхности точки оптимума (рис. 2–4) указывают на четко выраженную оптимальную область, которая позволяет определить факторы, обеспечивающие измельчение кормов при минимальной энергоемкости процесса, при котором условный оптимум функции представляет собой единственную точку, расположенную в центре поверхности, что дает наглядное представление о наиболее подходящей комбинации факторов, влияющих на процесс. Графический анализ поверхности точки оптимума позволяет определить оптимальные показатели факторов для каждого конкретного случая.



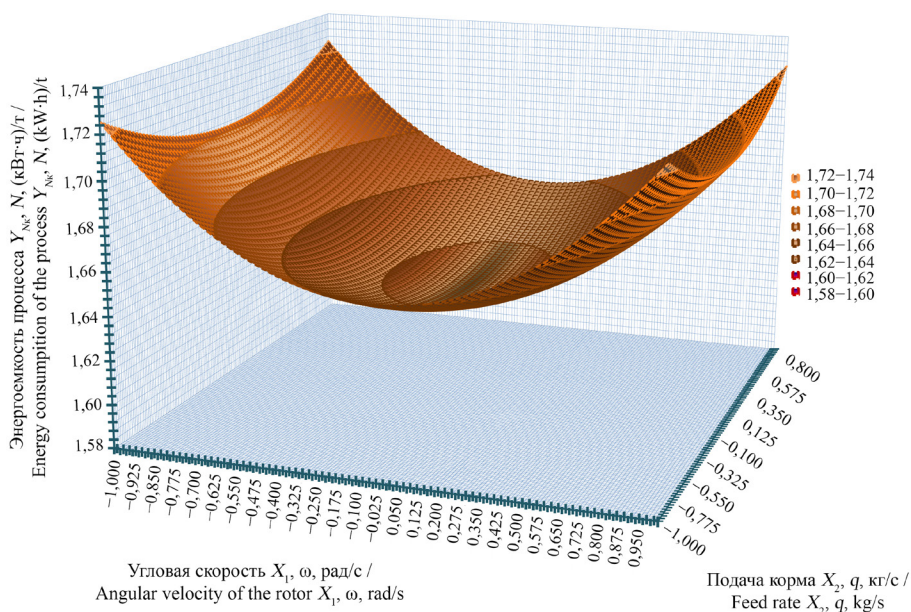
Р и с. 2. Поверхности точки оптимума для энергоемкости процесса измельчения грубых кормов $(N - Y_N), \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т}}$ как функция $\omega - X_1, \text{рад/с}$ и $q - X_2, \text{кг/с}$

F i g. 2. Optimum point surfaces for the energy consumption of the coarse feed grinding process $(N - Y_N), \frac{\text{kW}\cdot\text{h}}{\text{t}}$ as a function of $\omega - X_1, \text{rad/s}$ и $q - X_2, \text{kg/s}$



Р и с. 3. Поверхности точки оптимума для энергоемкости процесса измельчения зерновых кормов $(N - Y_{N_3}), \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$ как функция $\omega - X_1$, рад/с и $q - X_2$, кг/с

F i g. 3. Optimum point surfaces for the energy consumption of the grain feed grinding process $(N - Y_{N_3}), \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$ as a function of $\omega - X_1$, rad/s и $q - X_2$, kg/s

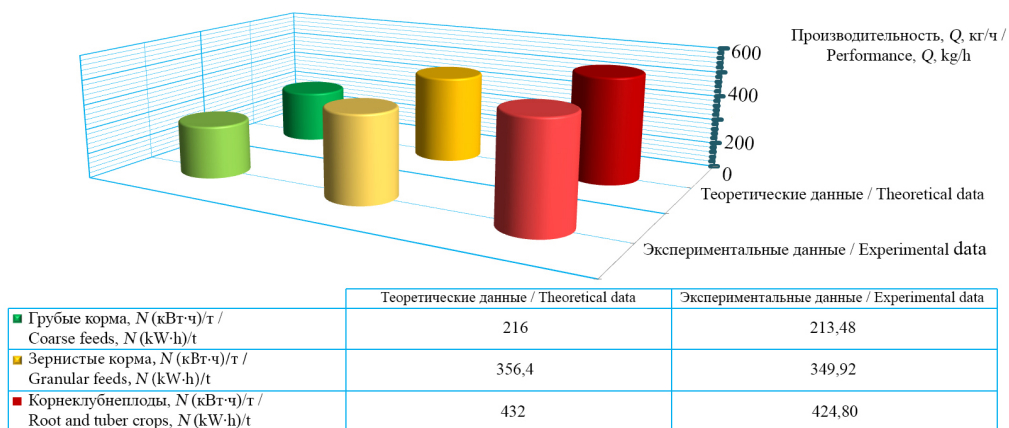


Р и с. 4. Поверхности точки оптимума для энергоемкости процесса измельчения корнеклубнеплодов $(N - Y_{N_4}), \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$ как функция $\omega - X_1$, рад/с и $q - X_2$, кг/с

F i g. 4. Optimum point surfaces for the energy consumption of the root-tuber crop grinding process $(N - Y_{N_4}), \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$ as a function of $\omega - X_1$, rad/s и $q - X_2$, kg/s

Сравнительные показатели теоретических и экспериментальных данных процесса измельчения кормов. При теоретическом обосновании производительности установки было определено, что оптимальная производительность достигается при скорости вращения ротора в диапазоне 205–211 рад/с.

Согласно теоретическим расчетам производительность установки составила для грубых кормов 0,06 кг/с (216 кг/ч), для зерновых кормов – 0,099 кг/с (356,4 кг/ч), для корнеклубнеплодов – 0,120 кг/с (432 кг/ч) (рис. 5).



Р и с. 5. Теоретические и экспериментальные данные производительности измельчительной установки

F i g. 5. Theoretical and experimental data on the performance of the grinding unit

По экспериментальным данным оптимальная производительность установки при скорости вращения ротора в диапазоне 205–211 рад/с для измельчения грубых кормов составила 0,0593 кг/с (213,48 кг/ч), для зерновых кормов – 0,0972 кг/с (349,92 кг/ч), а для корнеклубнеплодов – 0,1880 кг/с (424,80 кг/ч) (рис. 5).

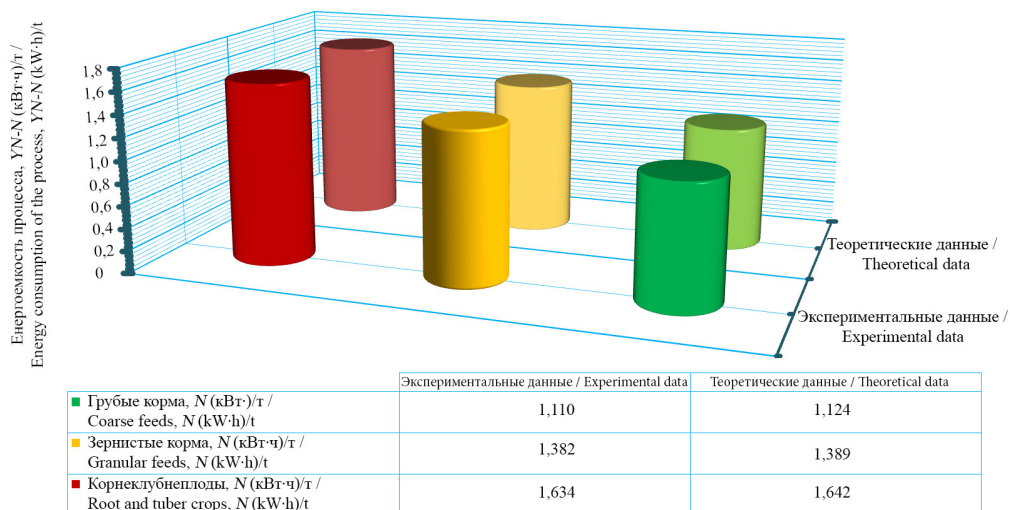
При теоретическом обосновании энергозатрат на измельчение корма было установлено, что минимальное потребление энергии достигается при частоте вращения рабочего органа в диапазоне 205–211 рад/с.

Теоретические значения энергозатрат для грубых кормов при этом составили $1,124 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$, для зерновых – $1,389 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$, для корнеклубнеплодов – $1,642 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$ (рис. 6).

По экспериментальным данным минимальное потребление энергии установки при скорости вращения ротора в диапазоне 205–211 рад/с для измельчения грубых кормов составило $1,110 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$, для зерновых кормов – $1,382 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$, а для корнеклубнеплодов – $1,634 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$ (рис. 6).

Разница между теоретическими и экспериментальными показателями по производительности для всех типов кормов составила 2 %, а по минимальному

энергопотреблению для грубых стебельчатых кормов – 1,5 %, для зерновых и корнеклубнеплодов – 0,5 %. Эти результаты подтверждают, что теоретические исследования хорошо согласуются с экспериментальными данными и отражают реальные процессы, происходящие при измельчении кормов.



Р и с. 6. Теоретические и экспериментальные данные энергоемкости измельчительной установки
F i g. 6. Theoretical and experimental data on the energy consumption of the grinding unit

Обсуждение и заключение. Универсальность измельчителя с комбинированным молотково-сегментным режущим рабочим органом обеспечивает качественное измельчение кормов за счет скользящего резания и равномерного воздействия по длине и ширине перерабатываемого корма (многоплоскостное резание). Установка позволяет одновременно измельчать грубые, зерновые и корнеклубнеплодные корма без необходимости внесения изменений и перенастроек конструкции. Кроме того, возможность реверсирования направления вращения электродвигателя позволяет использовать режущие ножи с обеих сторон, что увеличивает их долговечность, значительно снижает энергозатраты и повышает производительность в процессе эксплуатации.

Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют сделать следующие выводы:

- основным фактором воздействия на энергоемкость процесса при измельчении всех видов кормов является подача кормов в камеру измельчения;
- основной причиной увеличения энергоемкости процесса является увеличение силы резания в каждом сегменте рабочего органа в отдельности, вследствие увеличения за каждую единицу времени плотности корма, проходящего через рабочий орган измельчителя.

Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, предоставляют возможность для оптимизации рабочих процессов универсальной установки,

разработанной для измельчения кормов. Такая установка предназначена для использования в фермерских животноводческих хозяйствах, специализирующихся на разведении крупного рогатого скота. Полученные данные позволяют уточнить и улучшить ключевые параметры работы оборудования, такие как степень измельчения кормов, энергоэффективность, производительность и удобство эксплуатации. Таким образом происходит повышение качества кормовой базы, снижение затрат на приготовление кормов и улучшение условий содержания животных, что положительно сказывается на их продуктивности и общей экономической эффективности хозяйства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Chernovol M., Sviren M., Kisiliov R. Study of the Process of Preparing Feeding Mixtures Using the Composite Mixer. *Agricultural Science and Practice*. 2018;5(1):17–22. <https://doi.org/10.15407/agrisp5.01.017>
2. Atanov I.V., Kapustin I.V., Grinchenko V.A., Gritsay D.I., Kapustina E.I. Improving Efficiency of Feeding Cattle. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016;7(4):1927–1932. Available at: [https://www.rjpbcs.com/pdf/2016_7\(4\)/%5b248%5d.pdf](https://www.rjpbcs.com/pdf/2016_7(4)/%5b248%5d.pdf) (accessed 25.08.2024).
3. VandeHaar M.J. Feeding and Breeding for a More Efficient Cow. *WCDS Advances in Dairy Technology*. 2018;26:17–30. Available at: <https://clck.ru/3GbgWF> (accessed 25.08.2024).
4. Морозов Н.М., Рассказов А.Н. Направления механизации животноводства в малых формах хозяйствования. *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства*. 2017;2(26). URL: <https://clck.ru/3Gbgqe> (дата обращения: 24.08.2024).
Morozov N.M., Rasskazov A.N. The Direction of Animal Husbandry Mechanization on the Small Forms of Household. *Vestnik Vserossiyskogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Mekhanizatsii Zhivotnovodstva*. 2017;2(26). (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3Gbgqe> (accessed 24.08.2024).
5. Лепшина А.И., Белоусов С.В. Средства малой механизации как основа современного КФХ и ЛПХ в малых формах хозяйствования. *Научный журнал КубГАУ*. 2015;109. URL: <http://ej.kubagro.ru/2015/05/pdf/24.pdf> (дата обращения: 24.08.2024).
Lepshina A.I., Belousov S.V. Means of Small Mechanization as a Basis of Modern PFF and PBF in Small Forms of Management. *Scientific Journal of KubSAU*. 2015;109. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://ej.kubagro.ru/2015/05/pdf/24.pdf> (accessed 24.08.2024).
6. Солонщиков П.Н., Косолапов Е.В. Совершенствование и повышение эффективности технологического процесса приготовления и раздачи грубых кормов на фермах крупного рогатого скота. *Вестник НГИЭИ*. 2018;5(84):54–66. URL: https://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1627 (дата обращения: 24.08.2024).
Solonshchikov P.N., Kosolapov E.V. Improvement and Increase of Efficiency of Technological Process of Preparation and Distribution of Fodder on Farms Cattle. *Bulletin NGIEI*. 2018;5(84):54–66. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1627 (accessed 24.08.2024).
7. Ларетин Н.А., Шпаков А.С. Организация специализированного кормопроизводства в животноводческих хозяйствах молочного направления Российской Нечерноземья. *Вестник ВНИИМЖ*. 2015;2(18):169–177. EDN: TZBBUX
Laretin N.A., Shpakov A.S. [Organization of Specialized Feed Production in Livestock Farms of the Dairy Sector of the Russian Non-Chernozem Region]. *Vestnik VNIIMZH*. 2015;2(18):169–177. (In Russ.) EDN: TZBBUX
8. Ларетин Н.А. Особенности модернизации и создания устойчивой кормовой базы молочного скотоводства Нечерноземной зоны Российской Федерации. *Вестник ВНИИМЖ*. 2011;3(3). URL: <https://clck.ru/3GcRtu> (дата обращения: 23.08.2024).

- Laretin N.A. [Features of Modernization and Creation of a Sustainable Feed Base for Dairy Cattle Breeding in the Non-Chernozem Zone of the Russian Federation]. *Vestnik VNIIMZH*. 2011;3(3). (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3GcRtu> (accessed 23.08.2024).
9. Эшкобилова М.Ш., Холмуродова З.Д. Научное значение современных способов производства кормов и их качественные показатели. *Universum: технические науки*. 2024;3(120):12–15. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17025> (дата обращения: 23.08.2024).
Eshkobilova M.Sh., Kholmurodova Z.D. Scientific Importance of Modern Methods of Feed Production and their Quality Indicators. *Universum: Tekhnicheskie Nauki*. 2024;3(120):12–15. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17025> (accessed 23.08.2024).
10. Булатов С.Ю. Повышение эффективности приготовления кормов путем совершенствования конструкции и технологического процесса кормоприготовительных машин. *Пермский аграрный вестник*. 2017;1(17). URL: <https://clck.ru/3GcTXT> (дата обращения: 25.08.2024).
Bylatov S.Yu. [Improving the Efficiency of Feed Preparation by Improving the Design and Technological Process of Feed Preparation Machines]. *Permskij Agrarnyj Vestnik*. 2017;1(17). (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3GcTXT> (accessed 25.08.2024).
11. Солонщиков П.Н., Мошонкин А.М., Доронин М.С. Совершенствование машин и оборудования в производстве кормов в животноводстве. *Вестник НГИЭИ*. 2017;9(76):64–76. EDN: ZJTXET
Solonshchikov P.N., Moshonkin A.M., Doronin M.S. Improvement of Machinery and Equipment in the Production of Fodder. *Bulletin NGIEI*. 2017;9(76):64–76. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ZJTXET
12. Pretty J., Benton T.G., Bharucha Z.P., Dicks L.V., Flora C.B., Godfray H.J., et al. Global Assessment of Agricultural System Redesign for Sustainable Intensification. *Nature Sustainability*. 2018;1:441–446. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0114-0>
13. Zhao C., Liu B., Piao S., Wang X., Lobell D.B., Huang Y., et al. Temperature Increase Reduces Global Yields of Major Crops in Four Independent Estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017;114(35):9326–9331. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>
14. Van Loo E.J., Caputo V., Nayga R.M., Meullenet J.-F., Ricke S.C. Consumers' Willingness to Pay for Organic Chicken Breast: Evidence from Choice Experiment. *Food Quality and Preference*. 2011;22(7):603–613. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2011.02.003>
15. Lowder S.K., Scoet J., Raney T. The Number, Size, and Distribution of Farms, Smallholder Farms, and Family Farms Worldwide. *World Development*. 2016;87:16–29. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.10.041>
16. Herrero M., Thornton P.K., Mason-D'Croz D., Palmer J., Benton T.G., Bodirsky B.L., et al. Innovation Can Accelerate the Transition Towards a Sustainable Food System. *Nature Food*. 2020;1:266–272. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0074-1>
17. Ayugin N., Isaychev V., Khalimov R., Semashkin N. Method and Results of Studying the Influence of Grinder Knife Parameters on Specific Work of Feed Cutting. *BIO Web of Conferences. International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources"*. 2021;37:00022. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213700022>
18. Новиков В.В., Зотеев В.С., Камышева О.А., Грецов А.С. Результаты производственных испытаний экспериментального измельчителя корнеплодов. *Известия ОГАУ*. 2017;2(64):74–76. EDN: YMXGRH
Novikov V.V., Zoteev V.S., Kamyшева O.A., Gretsov A.S. [Results of Production Testing of an Experimental Root Crop Grinder]. *Izvestia OSAU*. 2017;2(64):74–76. (In Russ.) EDN: YMXGRH
19. Новиков В.В., Мишанин А.Л., Успенская И.В., Никитин В.А., Камышева О.А. Универсальный шнековый измельчитель кормов. Патент 142728 Российская Федерация. 27 июня 2014. EDN: YHFCWX
Novikov V.V., Mishanin A.L., Uspenskaya I.V., Nikitin V.A., Kamyшева O.A. [Universal Screw Feed Grinder]. Patent 142728 Russian Federation. 2014 June 27. (In Russ.) EDN: YHFCWX
20. Marczuk A., Blicharz-Kania A., Savinykh P.A., Isupov A.Y., Palichyn A.V., Ivanov I.I. Studies of a Rotary-Centrifugal Grain Grinder Using a Multifactorial Experimental Design Method. *Sustainability*. 2019;11(19):5362. <https://doi.org/10.3390/su11195362>

21. Абалихин А.М., Барабанов Д.В., Крупин А.В., Муханов Н.В. Оценка эффективности работы центробежного измельчителя фуражного зерна. *АгроЭкоИнженерия*. 2024;1(118):43–57. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-43-56>
Abalikhin A.M., Barabanov D.V., Krupin A.V., Mukhanov N.V. Evaluation of Performance Efficiency of Centrifugal Feed Grain Grinder. *AgroEkoEngineering*. 2024;1(118):43–57. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-43-56>
22. Волхонов М.С., Абалихин А.М., Крупин А.В. Обоснование конструкционных параметров нового измельчителя фуражного зерна. *Вестник НГИЭИ*. 2020;11(114):5–16. <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10101>
Volhonov M.S., Abalihin A.M., Krupin A.V. Justification of Design Parameters of a New Forage Grain Grinder. *Bulletin NGIEI*. 2020;11(114):5–16. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10101>
23. Фаталиев К.Г., Мамедов И.О., Кулиев З.В., Мамедов Х.А., Зейналов А.М., Мамедов Д.А., и др. Универсальный измельчитель кормов. Патент 2776311 Российская Федерация. 18 июля 2022. URL: <https://findpatent.ru/patent/277/2776311.html> (дата обращения: 25.08.2024).
Fataliev K.G., Mamedov I.O., Kuliev Z.V., Mamedov H.A., Zeynalov A.M., Mamedov D.A., et al. [Universal Feed Grinder]. Patent 2776311 Russian Federation. 2022 July 18. (In Russ.) Available at: <https://findpatent.ru/patent/277/2776311.html> (accessed 25.08.2024).

Об авторах:

Кулиев Закир Вагиф оглы, заведующий лабораторией механизации и автоматизации технологических процессов в животноводстве Научно-исследовательского Института «Агромеханика» Азербайджанского государственного аграрного университета (Az2000, Азербайджан, г. Гянджа, пр-т Ататюрка, 450), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6090-1853>, vaqifizz@gmail.com

Якубов Камал Гаджи оглы, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории механизации и автоматизации технологических процессов в животноводстве Научно-исследовательского Института «Агромеханика» Азербайджанского государственного аграрного университета (Az2000, Азербайджан, г. Гянджа, пр-т Ататюрка, 450), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1426-5581>, yakubov.k@gmail.com

Алиев Эльман Мухтар оглы, старший научный сотрудник лаборатории механизации и автоматизации технологических процессов в животноводстве Научно-исследовательского Института «Агромеханика» Азербайджанского государственного аграрного университета (Az2000, Азербайджан, г. Гянджа, пр-т Ататюрка, 450), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5371-2667>, bozhan@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

З. В. Кулиев – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

К. Г. Якубов – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Э. М. Алиев – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 25.10.2024; поступила после рецензирования 08.11.2024;
принята к публикации 15.11.2024*

About the authors:

Zakir V. Quliyev, Head of the Mechanization and Automation of Technological Processes in Animal Husbandry Laboratory, Scientific Research Institute “Agromechanics”, Azerbaijan State Agrarian University (450 Ataturk Ave., Ganja Az2000, Azerbaijan), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6090-1853>, vaqifizz@gmail.com

Kamal H. Yaqubov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher of the Mechanization and Automation of Technological Processes in Animal Husbandry Laboratory, Scientific Research Institute “Agromechanics”, Azerbaijan State Agrarian University (450 Ataturk Ave., Ganja Az2000, Azerbaijan), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1426-5581>, yaqubov.k@gmail.com

Elman M. Aliev, Senior Researcher of the Mechanization and Automation of Technological Processes in Animal Husbandry Laboratory, Scientific Research Institute “Agromechanics”, Azerbaijan State Agrarian University (450 Ataturk Ave., Ganja Az2000, Azerbaijan), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5371-2667>, bozhan@gmail.com

Authors contribution:

Z. V. Kuliev – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data; preparing the manuscript: critical analysis of the draft manuscript, making comments and corrections by members of the research team including at the pre- and post-publication stages.

K. G. Yakubov – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data; preparing the manuscript, specifically visualizing the study results and the data obtained.

E. M. Aliev – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data; preparing the manuscript, specifically visualizing the study results and the data obtained.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 25.10.2024; revised 08.11.2024; accepted 15.11.2024