Аграрный научный журнал. 2024. № 11. С. 156–162
Agrarian Scientific Journal. 2024;(11):156–162

АГРОИНЖЕНЕРИЯ
4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

Научная статья
УДК 631.363.24
doi: 10.28983/asj.y2024i11pp156-162

Результаты экспериментальных исследований измельчителя СМ2500-G

Игорь Евгеньевич Припоров, Руслан Евгеньевич Иванайский
Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, г. Краснодар, Россия
e-mail: i.priporov@yandex.ru

Аннотация. В статье представлена модернизация серийного измельчителя типа СМ2500-G. В серийном измельчителе типа СМ2500-G зерновой материал измельчается за счет ударов 20 шарнирно закрепленных молотков, которые подвешены на вращающемся барабане. Однако они имеют существенные недостатки, приведенные в работе. Для повышения производительности и снижения энергоемкости серийного измельчителя типа СМ2500-G предложено заменить рабочий орган на режущие ножи в виде криволинейного треугольника Арбелоса Архимеда с пилообразными зубьями по периметру всей поверхности режущей кромки. В результате проведенных исследований получены уравнения для определения производительности переоборудованного измельчителя типа СМ2500-G и удельной энергоемкости процесса измельчения жмыха подсолнечного в зависимости от выбранных параметров. Переоборудованный измельчитель типа СМ2500-G по сравнению с серийным позволяет его унифицировать и сократить удельную энергоемкость процесса измельчения жмыха подсолнечного. При данных рациональных значениях конструктивных параметров (количество зубьев N на режущем ноже составляет 28…32 шт., частота вращения ротора $\omega_р$ = 255…269 $с^{-1}$, высота зуба на режущем ноже h = 7,5…9,5 мм) усовершенствованного измельчителя типа СМ2500-G определена его производительность и удельная энергоемкость процесса измельчения жмыха подсолнечного, которая составила 196,6 кг/ч и 5,21 кВт·ч/т соответственно.

Ключевые слова: измельчитель; жмых подсолнечный; рабочий орган; ножи режущие; удельная энергоемкость

Для цитирования: Припоров И. Е., Иванайский Р. Е. Результаты экспериментальных исследований измельчителя СМ2500-G // Аграрный научный журнал. 2024. № 11. С. 156–162. http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i11pp156-162.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

The results of experimental studies of the CM2500-G shredder

Igor E. Priporov, Ruslan E. Ivanaisky
Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russia
e-mail: i.priporov@yandex.ru

Abstract. The article presents the modernization of the CM2500-G type serial shredder. In a serial shredder of the CM2500-G type, grain material is crushed by the blows of 20 hinged hammers that are suspended on a rotating drum. However, they have significant drawbacks given in the paper. To increase its productivity and reduce energy consumption in a serial shredder of the CM2500-G type, it was proposed to replace the working body with cutting knives in the form of the Archimedes' Arbelos curved triangle with saw teeth along the perimeter of the entire surface of the cutting edge. As a result of the conducted research, equations were obtained to determine the performance of a converted CM2500-G type shredder and the specific energy intensity of the sunflower cake grinding process, depending on the selected parameters. The converted CM2500-G type shredder, compared with the serial one, allows it to be standardized and reduce the specific energy consumption of the sunflower cake grinding process. With these rational values of design parameters (the number of teeth N on the cutting knife is 28...32 pcs., the rotor speed ω_r = 255...269 s^{-1} and the tooth height on the cutting knife is h = 7.5...9.5 mm) of the improved CM2500-G type shredder, its performance and specific energy consumption of the sunflower cake grinding process are determined, which amounted to 196.6 kg/h and 5.21 kWh/t, respectively.

Keywords: shredder; sunflower cake; working organ; cutting knives; specific energy consumption

For citation: Priporov I. E., Ivanaisky R. E. The results of experimental studies of the CM2500-G shredder. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2024;(11):156–162. (In Russ.). http: http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i11pp156-162.

Введение. Создание прочной кормовой базы является главным условием развития животноводства. Поэтому разработка технологических процессов приготовления кормов и технических средств для их осуществления является актуальной проблемой при производстве животноводческой продукции [10].

Фермерские хозяйства с небольшой численностью поголовья КРС [11, 13] для измельчения кормов используют малогабаритные молотковые дробилки, т.к. они просты по конструкции и имеют малые габаритные размеры при высокой производительности и быстрой окупаемости [4]. Приведенные показатели создают все необходимые условия для их использования в малых хозяйствах [3, 7].

Недостатки следующие: высокая энергоемкость измельчения кормов [6, 8]; высокая производительность относительно реальных потребностей хозяйств в измельченном жмыхе; загруженность до 5 %; использование на разных видах измельчаемых продуктов (зерно, жмых) осложнено заменой рабочих органов; не отвечают технико-экономическим требованиям; непригодны к измельчению крупнокусковых материалов [9].

Для конкретных условий полученных результатов недостаточно в связи с совершенствованием техники, и потребители выдвигают требования к техническим показателям [5, 12, 14–16, 18].

Цель работы – снижение энергоемкости измельчения жмыха и повышение производительности измельчителя.

Задачи исследования: провести модернизацию молотковой дробилки типа СМ2500-G для получения жмыха подсолнечного; оптимизировать параметры модернизированного измельчителя жмыха.

Материалы и методы. На кафедре «Тракторы, автомобили и техническая механика» проводятся исследования, направленные на совершенствование молотковых дробилок/измельчителей жмыха подсолнечного (рисунок 1).

а ***б***

Рисунок 1 – Общий вид измельчителя типа СМ2500-G:
а – заводской рабочий орган – молотки;
б – переоборудованный – режущий нож криволинейного треугольника Арбелоса Архимеда

Figure 1 – General view of the CM2500-G type shredder:
a – factory working body – hammers;
b – modernized – cutting knife of the Archimedes' Arbelos curved triangle

В качестве приборов и оборудования использовали весы, ситовый классификатор, секундомер.

На конструкцию модернизированного измельчителя получен патент № 2648392 РФ.

В серийном измельчителе типа СМ2500-G зерновой материал измельчается за счет ударов 20 шарнирно закрепленных молотков, которые подвешены на вращающемся барабане.

Методика исследований по определению энергоемкости измельчения жмыха и производительности модернизированного измельчителя жмыха основана на планировании полного факторного эксперимента. В качестве математической модели выбран 3-уровневый план Бокса-Бенкина [1].

Показатели фиксировали для трех повторностей при разных параметрах, которые задавались на модернизированном измельчителе жмыха подсолнечного типа СМ2500-G.

Исследовали влияние количества зубьев на режущем ноже N (фактор x_1), частоты вращения ротора ω_p (фактор x_2) и высоты зуба на режущем ноже h (фактор x_3) измельчителя на его производительность Q и удельную энергоемкость процесса измельчения жмыха подсолнечного w.

Данные факторы выбраны на основе априорного их ранжирования: x_1 = 13 специалистов, x_2 = 17 специалистов и x_3 = 16 специалистов.

Значения фактора x_1 изменялись от 24 до 36 шт. с шагом 6 шт., фактора x_2 – от 210 до 314 $с^{-1}$ [2] с интервалом 52 $с^{-1}$, фактора x_3 – от 6 до 10 мм. Критерий y_1 характеризовал производительность измельчителя, кг/ч, y_2 – удельная энергоемкость процесса измельчения жмыха подсолнечного [17], кВт·ч/т. Определение коэффициентов уравнений регрессий и оценку адекватности построенных моделей проводили в программе Mathcad 15.

Перед началом проведения эксперимента значения факторов кодировались.

Результаты исследований. В результате проведенных экспериментальных исследований получены числовые значения производительности измельчителя и удельной энергоемкости процесса измельчения жмыха, значения которых в зависимости от факторов приведены в таблице 1.

Матрица планирования эксперимента с результатами опытов представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Матрица планирования эксперимента с результатами опытов

Table 1 – Experiment planning matrix with experimental results

№ опыта	Факторы			Критерии оптимизации	
	x_1	x_2	x_3	y_1, кг/ч	y_2, кВт·ч/т
1	+1	+1	+1	150	3,5
2	+1	+1	–1	180	3,2
3	–1	+1	+1	200	3,4
4	–1	+1	–1	210	5,3
5	+1	–1	+1	250	6,7
6	+1	–1	–1	260	7,0
7	–1	–1	+1	263	7,3
8	–1	–1	–1	280	4,5
9	0	0	+1	254	6,4
10	0	0	–1	225	5,1
11	+1	0	0	185	1,1
12	–1	0	0	195	4,2
13	0	+1	0	151	4,1
14	0	–1	0	223	3,5

После обработки результатов эксперимента получены следующие уравнения регрессии в кодированном виде (с доверительной вероятностью 95 %):

$$y_1 = 208{,}6 + 1{,}2x_1 - 3{,}98x_2 - 36{,}2x_3 + 11{,}76x_1x_2 + 15{,}5x_1x_3 + 9{,}98x_2x_3 - (-61{,}88x_1^2) + \\ + 28{,}66x_2^2 + 26{,}13x_3^2; \quad (1)$$

$$y_2 = 5{,}13 - 0{,}64x_1 - 0{,}08x_2 + 0{,}39x_3 - 0{,}37x_1x_2 + 0{,}012x_1x_3 - 0{,}62x_2x_3 - (-0{,}97x_1^2) + \\ + 0{,}27x_2^2 + 2{,}14x_3^2. \quad (2)$$

Проверка на адекватность моделей (1) и (2) показала их адекватность. Наибольшее влияние на критерий y_1 оказывает фактор x_3 и в меньшей степени – x_1 и x_2, а на y_2 – факторы x_1 и x_3 и в меньшей степени x_2.

Минимальное значение показателя удельной энергоемкости в сечении области оптимума относительно количества зубьев на режущем ноже x_1, частоты вращения ротора x_2 и высоты зуба на режущем ноже x_3 измельчителя, зафиксированных на нулевом уровне, равно 5,21 кВт·ч/т, а производительность измельчителя 196,6 кг/ч находится в пределах N = 28…32 шт., $\omega_р$ = 255…269 $с^{-1}$, высота зуба h = 7,5…9,5 мм.

После раскодирования моделей (1) и (2) получим уравнения, которые описывают изменения производительности измельчителя и удельной энергоемкости в натуральных величинах:

$$Q = 773{,}79 + 83{,}11N - 7{,}53\omega_p - 186{,}49h + 0{,}038N\omega_p + 1{,}29Nh + +0{,}096\omega_p h - 1{,}72N^2 + \\ + \ 0{,}011\omega_p^2 + 6{,}53h^2; \quad (3)$$

$$w = 2{,}29 + 1{,}82N + 0{,}03\omega_p - 6{,}84h - 0{,}0012N\omega_p + 0{,}001Nh - 0{,}006\omega_p h - (-0{,}027N^2) + \\ + 0{,}0001\omega_p^2 + 0{,}536h^2. \quad (4)$$

Задав количество зубьев на режущем ноже, частоту вращения ротора и высоту зуба на режущем ноже, по уравнениям регрессии (3) и (4) можно рассчитать производительность измельчителя (рисунок 2) и удельную энергоемкость процесса измельчения жмыха подсолнечного (рисунок 3). С изменением высоты зуба на режущем ноже и количества зубьев на режущем ноже происходит соответственное уменьшение и увеличение производительности измельчителя и удельной энергоемкости измельчения жмыха подсолнечного.

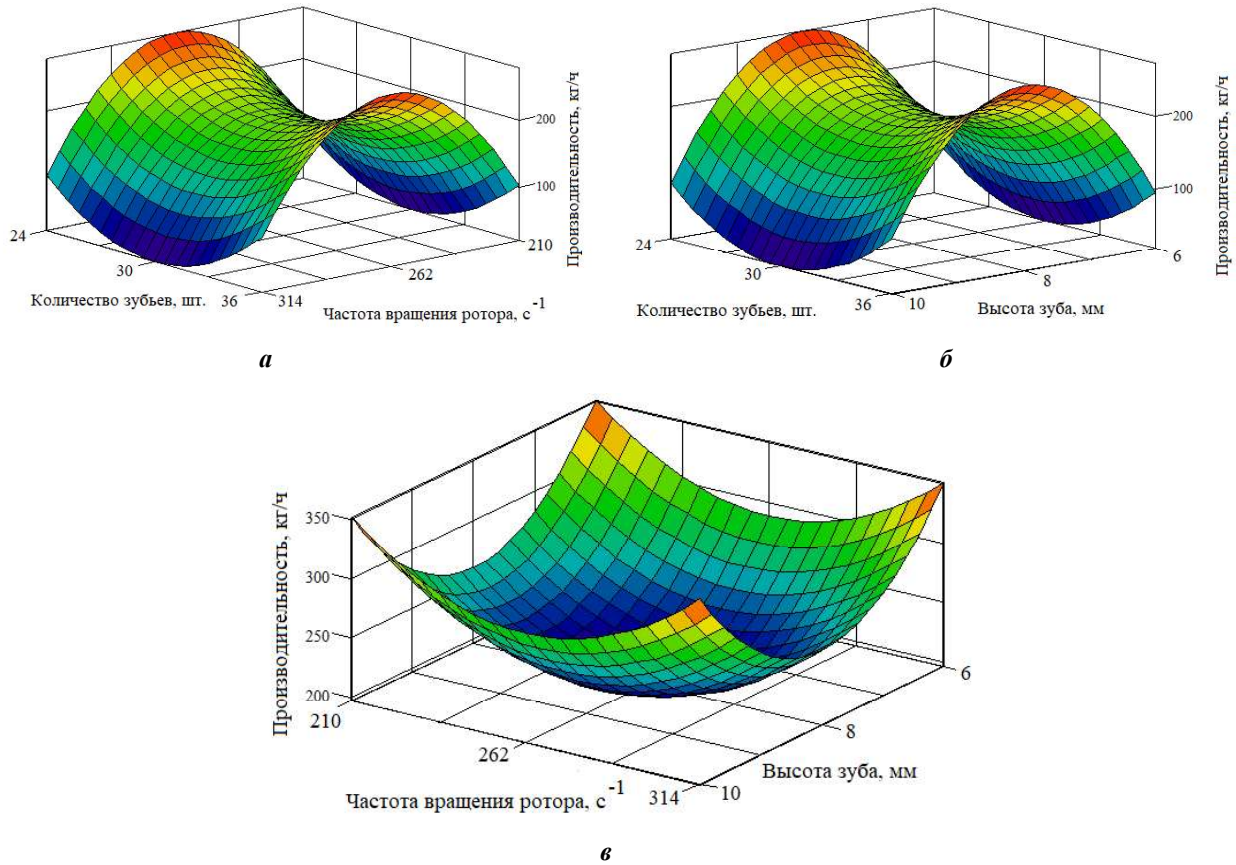


Рисунок 2 – Поверхности откликов зависимости производительности от изучаемых факторов: а – количество зубьев и частота вращения; б – количество зубьев и высота зуба; в – частота вращения ротора и высота зуба

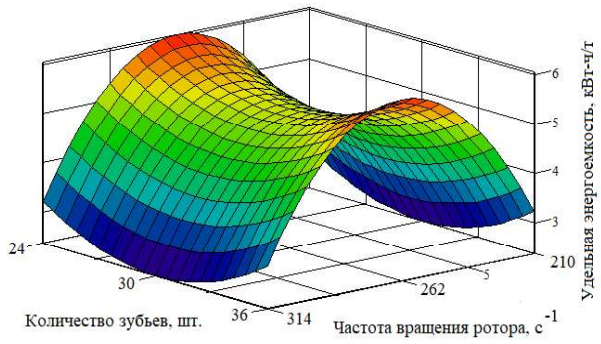
Figure 2 – The surfaces of dependence response on the performance of the studied factors: a – the number of teeth and the rotation speed; b – the number of teeth and the tooth height; c – the rotor speed and the tooth height

На основании найденных оптимальных значений факторов проведены производственные испытания переоборудованного измельчителя типа СМ2500-G при измельчении жмыха подсолнечного, вид ракушка (рисунок 4).

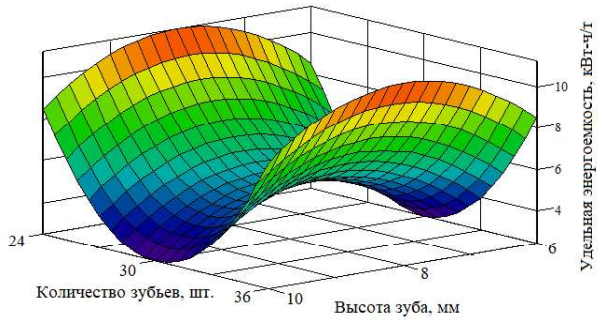
Характеристика жмыха подсолнечного по массовой доле контролируемых показателей при P = 0,95 для измельчения на измельчителе СМ-2500G приведена в таблице 2.

Массовые доли контролируемых показателей при P = 0,95 для измельчения жмыха подсолнечного на измельчителе СМ-2500G находятся в пределах норм, установленных согласно ГОСТ Р 53600-2009 (таблица 2).

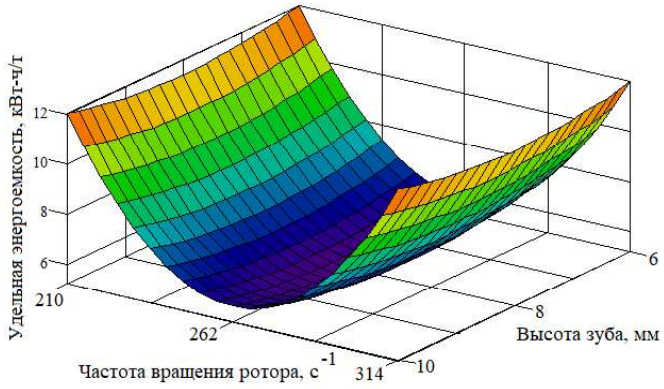
Полученный жмых подсолнечный для измельчения отдан на экспертизу в испытательную лабораторию «Центр качества пищевой продукции» НИИ биотехнологии и сертификации пищевой продукции при ФГБОУ ВО Кубанского ГАУ.



а



б



в

Рисунок 3 – Поверхности откликов зависимости удельной энергоемкости от изучаемых факторов: а – количество зубьев и частота вращения; б – количество зубьев и высота зуба; в – частота вращения ротора и высота зуба

Figure 3 – The surfaces of dependence response on the specific energy intensity of the studied factors: a – the number of teeth and rotation speed; b – the number of teeth and tooth height; c – the rotor speed and tooth height

а ***б***

Рисунок 4 – Жмых подсолнечный, вид ракушка: а – исходный; б – после измельчения

Figure 4 – Sunflower cake, shell type: a – initial; b – after grinding

Таблица 2 – Характеристика жмыха подсолнечного для измельчения

Table 2 – Characteristics of sunflower cake for grinding

Показатель	Норма	
	Готовый материал	ГОСТ Р 53600-2009
Массовая доля влаги и летучих веществ, %	6,4±0,3	от 1 до 8 вкл.
Массовая доля жира и экстракционных веществ, %	5,7±0,6	от 5 до 20 вкл.
Массовая доля сырого протеина, %	35,6±0,5	от 20 до 40 вкл.

Производственные испытания модернизированного измельчителя типа СМ-2500G показали соответствие зоотехническим требованиям согласно ГОСТ Р 53600-2009.

Заключение. В результате проведенных исследований получены уравнения для определения производительности переоборудованного измельчителя типа СМ2500-G и удельной энергоемкости процесса измельчения жмыха подсолнечного в зависимости от количества зубьев на режущем ноже, частоты вращения ротора и высоты зуба на режущем ноже.

Переоборудованный измельчитель типа СМ2500-G по сравнению с серийным позволяет унифицировать агрегат и снизить удельную энергоемкость процесса измельчения жмыха подсолнечного.

При найденных рациональных значениях конструктивных параметров усовершенствованного измельчителя типа СМ2500-G определена его производительность и удельная энергоемкость процесса измельчения, которая составила 196,6 кг/ч и 5,21 кВт·ч/т соответственно.

В дальнейших исследованиях необходимо продолжить работу по совершенствованию конструктивно-режимных параметров работы измельчителя жмыха в направлении снижения удельной энергоемкости измельчения и повышения его производительности. Для дальнейшей реализации полученных результатов исследований является обоснование внедрения в конструкцию измельчителя жмыха режущего ножа криволинейного треугольника Арбелоса Архимеда, имеющего следующие конструктивно-режимные параметры: количество зубьев N = 28…32 шт., частота вращения ротора $\omega_р$ = 255…269 с$^{-1}$, высота зуба на режущем ноже h = 7,5…9,5 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: «Наука», 1976. 280 с.

2. Анализ влияния конструктивно-режимных параметров на процесс измельчения фуражного зерна в многоступенчатом измельчителе / И. Б. Шагдыров [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства. Межведомственный тематический сборник. В 2-х томах. Минск, 2014. С. 104–110.

3. Вердиева Т. З. Определение коэффициента регрессии при измельчении зерновых кормов малогабаритными дробилками // Российская сельскохозяйственная наука. 2018. № 2. С. 65–67.

4. Вердиева Т. З. Расход энергии при измельчении зерновых кормов // Успехи современной науки и образования. 2016. Т. 2. № 7. С. 129–132.

5. Мохнаткин В. Г., Поярков М. С., Горбунов Р. М. Повышение пропускной способности молоткового измельчителя с горизонтальным подающим бункером // Пермский аграрный вестник. 2020. № 3(31). С. 23–30.

6. Оптимизационные математические модели измельчения сырья при производстве комбикормов на основе кормового обогатительного концентрата / Ж. С. Алимкулов [и др.] // Вестник ЮУрГУ. 2020. Т. 8. № 2. С. 29–36. DOI: 10.14529/food200204.

7. Садов В. В., Лопатин И. А. Универсальный измельчитель кормов для малых ферм // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сборник материалов XVIII Междунар. науч.-практ. конф. В 2 кн. Барнаул, 2023. С. 159–160. EDN: RZODZJ.

8. Солонщиков П. Н., Косолапов Е. В. Оптимизация основных параметров молоткового измельчителя при приготовлении грубых кормов // Пермский аграрный вестник. 2018. № 1(21). С. 34–41.

9. Тишанинов Н. П., Калиниченко С. Г., Анашкин А. В. Универсальная дробилка компонентов кормов // Наука в центральной России. 2013. № 3. С. 4–10. EDN: RDLGCZ.

10. Хажметов Л. М., Габачиев Д. Т. Результаты исследований конструктивно-режимных параметров измельчителя грубых кормов // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2020. № 4(30). С. 79–86.

11. Crossley R. E., Harlander-Matauschek A., DeVries T. J. Mitigation of variability between competitively fed dairy cows through increased feed delivery frequency // Journal of Dairy Science. 2018. Issue 1(101). P. 518–529. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2017-12930.

12. Development and theoretical studies of grain cleaning machine for fractional technology of flattening forage grain / P. Savinyh [et al.] // Engineering for rural development, Proceedings. 2018. Vol. 17. P. 124–130. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N156.

13. Effects of feeding frequency on the lying behaviour of dairy cows in a loose housing with automatic feeding and milking system / G. Mattachini [et al.] // Animals. 2019. Issue 9. No. 121. DOI: 10.3390/ani9040121.

14. Influence of rotary grain crusher parameters on quality of finished product / P. Savinyh [et al.] // Engineering for rural development, Proceedings. 2018. Vol. 17. P. 131–136. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N158.

15. Justification of the technological scheme of the pick-straw shredder / V. G. Kushnir [et al.] // 3i Intelekt, Ideya, Innovatsiya. 2016. No. 2. 280 p.

16. Kushnir V. G., Gavrilov N. V., Kim S. A. Justification of the Design of the Two-Shaft Mixer of Forages // Procedia Engineering. 2016. No. 150. 2014 p. EDN: XFHSKB.

17. Priporov I. E., Kurasov V. S., Samurganov E. E. Improvement of the efficiency of sunflower cake grinding // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020. Vol. 488. DOI: 10.1088/1755-1315/488/1/012037.

18. Research results of grain shredder by using multiplied method of evaluation / P. A. Savinykh [et al.] // Agricultural Engineering. 2019. Vol. 23. No. 1. P. 81–94. DOI: 10.1515/agriceng-2019-0008.

REFERENCES

1. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovsky Yu. V. Planning an experiment while searching for optimal conditions. 2nd revised edition. Moscow, 1976. 280 p. (In Russ.).

2. Analysis of the influence of structural and regime parameters on the process of grinding feed grain in a multistage shredder / I. B. Shagdyrov, V. I. Konovalov, B. I. Shagdyrov, A. I. Punko. *Mechanization and Electrification of Agriculture. An Interdepartmental Thematic Collection*. In 2 vol. Minsk, 2014:104–110. (In Russ.).

3. Verdieva T. Z. Determination of the regression coefficient when grinding grain feeds with small-sized crushers. *Russian Agricultural Science*. 2018;(2):65–67. (In Russ.).

4. Verdieva T. Z. Energy consumption when grinding grain feeds. *Success of Modern Science and Education*. 2016;2(7):129–132. (In Russ.).

5. Mokhnatkin V. G., Poyarkov M. S., Gorbunov R. M. Increasing the throughput of a hammer shredder with a horizontal feed hopper. *Perm Agrarian Bulletin*. 2020;3(31):23–30. (In Russ.).

6. Optimization mathematical models of grinding of raw materials in the production of compound feeds based on feed concentrate / J. S. Alimkulov, M. T. Velyamov, K. N. Fazylova. *Bulletin of SUSU*. 2020;8(2):29–36. DOI: 10.14529/food200204 (In Russ.).

7. Sadov V. V., Lopatin I. A. Universal feed shredder for small farms. *Agrarian science – Agriculture: Collection of Materials of the XVIII Scientific and Practical International Conference*. In 2 books. Barnaul, 2023. 159–160. EDITOR: RZODZJ (In Russ.).

8. Solonshchikov P. N., Kosolapov E. V. Optimization of the main parameters of a hammer grinder in the preparation of coarse feed. *Perm Agrarian Bulletin*. 2018;1(21):34–41. (In Russ.).

9. Tishaninov N. P., Kalinichenko S. G., Anashkin A. V. Universal crusher of feed components. *Science in Central Russia*. 2013;(3):4–10. EDN: RDLGCZ (In Russ.).

10. Khazhmetov L. M., Gabachiev D. T. The results of research on the design and operating parameters of the coarse feed shredder. *Izvestiya Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V. M. Kokov*. 2020;4(30):79–86. (In Russ.).

11. Crossley R. E., Harlander-Mataushek A., Devris T. J. Reducing variability between dairy cows on competitive feeding by increasing the frequency of feed supply. *Journal of Dairy Science*. 2018;1(101):518–529. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2017-12930.

12. Development and theoretical studies of grain cleaning machine for fractional technology of flattening forage grain / P. Savinyh, Yu. Sychugov, V. Kazakov, S. Ivanovs. *Engineering for Rural Development, Proceedings*. 2018;(17):124–130. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N156.

13. The effect of feeding frequency on the recumbent behavior of dairy cows in an open room with an automatic feeding and milking system / G. Mattacini, J. Pompe, A. Finzi, E. Tullo, E. Riva, G. Provolo. *Animals*. 2019;9(121). DOI: 10.3390/ani9040121.

14. Influence of rotary grain crusher parameters on quality of finished product / P. Savinyh, V. Shirobokov, O. Fedorov, S. Ivanovs. *Engineering for Rural Development, Proceedings*. 2018;(17):131–136. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N158.

15. Justification of the technological scheme of the pick-straw shredder / V. G. Kushnir, N. Gavrilov, S. Kim. *3i Intelekt, Ideya, Innovatsiya*. 2016;(2):280.

16. Justification of the Design of the Two-Shaft Mixer of Forages / V. G. Kushnir, N. V. Gavrilov, S. A. Kim. *Procedural Engineering.* 2016;(150):2014. EDN: XFHSKB.

17. Priporov I. E., Kurasov V. S., Samurganov E. E. Improving the efficiency of grinding sunflower cake. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;(488). DOI: 10.1088/1755-1315/488/1/012037.

18. Research results of grain shredder by using multiplied method of evaluation / P. A. Savinykh, A. Yu. Isupov, A. Palichyn. *Agricultural Engineering*. 2019;23(1):81–94. DOI: 10.1515/agriceng-2019-0008.

Статья поступила в редакцию 19.03.2024; одобрена после рецензирования 18.04.2024; принята к публикации 25.04.2024.
The article was submitted 19.03.2024; approved after reviewing 18.04.2024; accepted for publication 25.04.2024.