

Научная статья

УДК 631.363.2

EDN HPXJLG

<https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-4-104-112>

**Системный подход в обосновании оптимальной загрузки
молотковой дробилки в технологической линии приготовления комбикормов**

Виктор Викторович Садов¹, Сергей Анатольевич Сорокин²^{1,2} Алтайский государственный аграрный университет, Алтайский край, Барнаул, Россия¹ sadov.80@mail.ru, ² sorokin_sg@mail.ru

Аннотация. В статье представлено исследование процесса загрузки молотковой дробилки шнековым питателем с возможностью регулирования подачи и влияния подачи на основные выходные параметры. Определены факторы, влияющие на процесс работы дробилки совместно с питателем, а также составлена модель управления работой данной системы. Спроектирована и изготовлена прямоточная линия для измельчения зерновых компонентов, с которой проведены экспериментальные исследования. Разработана программа управления процессом дозирования зернового материала. Получены экспериментальные зависимости по влиянию удельных затрат энергии на производительность и средний размер частиц при изменении подачи материала в дробилку. Данные результаты позволят получить требуемый модуль помола при наименьших затратах энергии и возможность регулирования модуля в процессе измельчения через управление питателем с помощью программного обеспечения.

Ключевые слова: зерновые компоненты, размер дерти, модуль помола, энергоёмкость процесса, линия измельчения, питатель, загрузка дробилки, случайный процесс

Для цитирования: Садов В. В., Сорокин С. А. Системный подход в обосновании оптимальной загрузки молотковой дробилки в технологической линии приготовления комбикормов // Дальневосточный аграрный вестник. 2024. Том 18. № 4. С. 104–112. <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-4-104-112>.

Original article

**A systematic approach to substantiate
the optimal loading of a shredder in a feed production line**

Viktor V. Sadov¹, Sergey A. Sorokin²^{1,2} Altai State Agricultural University, Altai krai, Barnaul, Russian Federation¹ sadov.80@mail.ru, ² sorokin_sg@mail.ru

Abstract. The article presents a study of the process of loading a shredder with an auger feeder with the possibility of regulating the feed and the effect of feed on the main output parameters. The factors influencing the operation process of the shredder together with the feeder are determined, and a model for controlling the operation of this system is compiled. A direct-flow line for grinding grain components was designed and manufactured, with which experimental studies were conducted. A program for controlling the process of dosing grain material has been developed. Experimental dependences on the effect of specific energy consumption on productivity and average particle size when changing the material supply to the shredder are obtained. These results will allow us to obtain the required grinding module with the lowest energy consumption and the possibility of regulating the module during the grinding process through the control of the feeder using software.

Keywords: grain components, groats size, grinding module, process energy intensity, grinding line, feeder, shredder loading, random process

For citation: Sadov V. V., Sorokin S. A. A systematic approach to substantiate the optimal loading of a shredder in a feed production line. *Dal'nevostochnyi agrarnyi vestnik*. 2024;18;4:104–112. (in Russ.). <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-4-104-112>.

Введение. Процессы измельчения материалов присутствуют во многих отраслях и направлены на получение частиц требуемой фракции. Несмотря на высокую энергоёмкость процесса измельчения, его организация в рамках технологического процесса производства комбикормов может осуществляться на любом этапе, как для отдельных компонентов, так и для нескольких одновременно измельчаемых компонентов. Основанием этого являются в большей степени качественные показатели продукта [1–5].

В комбикормовом производстве задействовано достаточное количество технологического, транспортного и накопительного оборудования, объединённого производственной логической цепью. Молотковая дробилка выступает в роли ведущего звена иерархической ступени в линии производства комбикормов и является объединяющим звеном между технологическими параметрами процесса и выходными критериями оптимальности качества продукции [6, 7].

Существующие конструкции молотковых дробилок позволяют существенно изменять удельную энергоёмкость процесса и выравнивать модуль помола в зависимости от конструктивных особен-

ностей, физико-механических свойств материала, равномерности его подачи и других факторов [8–11].

В настоящее время большинство возможностей по оптимизации процесса путем улучшения конструкций и организации процесса измельчения исчерпаны, что говорит о необходимости системного подхода с применением информационных технологий к обоснованию оптимальной работы системы измельчения [12–14].

Цель работы состоит в повышении эффективности загрузки молотковой дробилки с горизонтально расположенным ротором шнековым питателем и определении ее влияния на энергоёмкость процесса и модуль помола.

Материалы и методы исследований. Системный подход в исследовании процесса измельчения предполагает математическое моделирование при учете конструктивных особенностей и оптимизации режимов, а также условий функционирования [14–16].

Модель управления дробилкой совместно с питателем представлена на рисунке 1. В данном случае входными (контролируемыми/неуправляемыми) параметрами X являются физико-механиче-

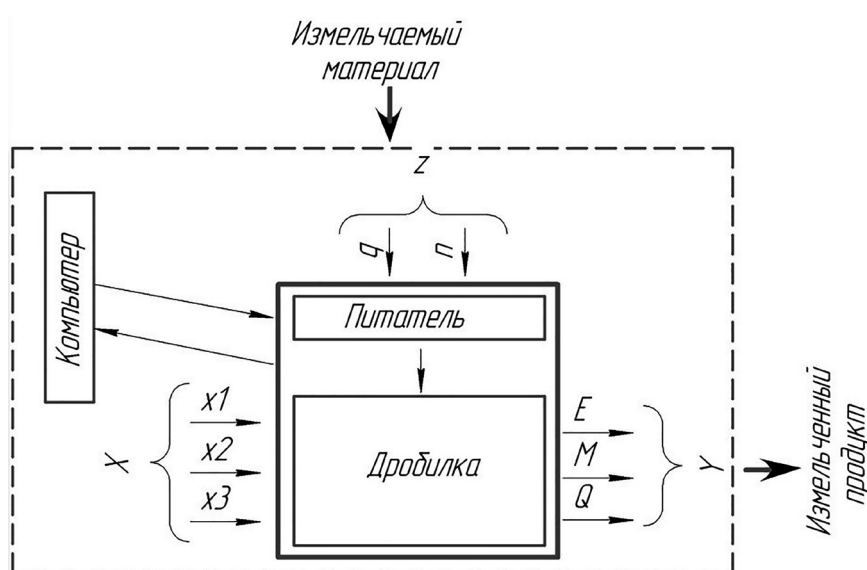


Рисунок 1 – Модель управления питателя с дробилкой
Figure 1 – Control model of a feeder with a shredder

ские свойства материала; контролируемые управляемыми факторами Z выступают подача q и частота вращения питателя n , а выходными параметрами или критериями оптимальности Y – удельная энергоёмкость процесса E , производительность Q и модуль помола M [17, 18].

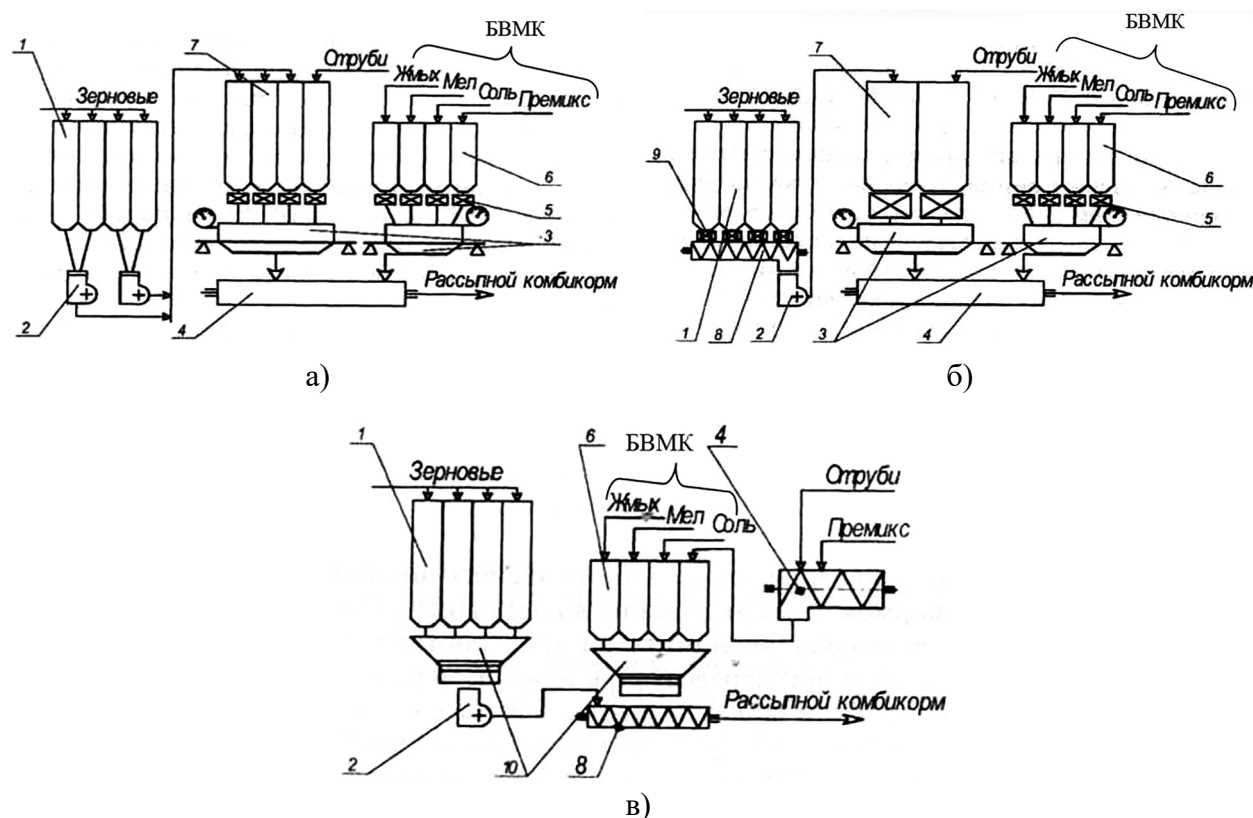
На основе анализа компоновок хозяйственных линий для производства комбикормов и выпускаемого оборудования, можно утверждать, что значительная часть линий выполняется по приведенным на рисунке 2 схемам [4].

На базе Алтайского государственного аграрного университета в качестве экспериментальной линии была спроектирована и изготовлена линия по прямоточной схеме, которая позволила снизить ко-

личество накопительного и транспортного оборудования [6]. Экспериментальный вариант линии измельчения представлен на рисунке 3.

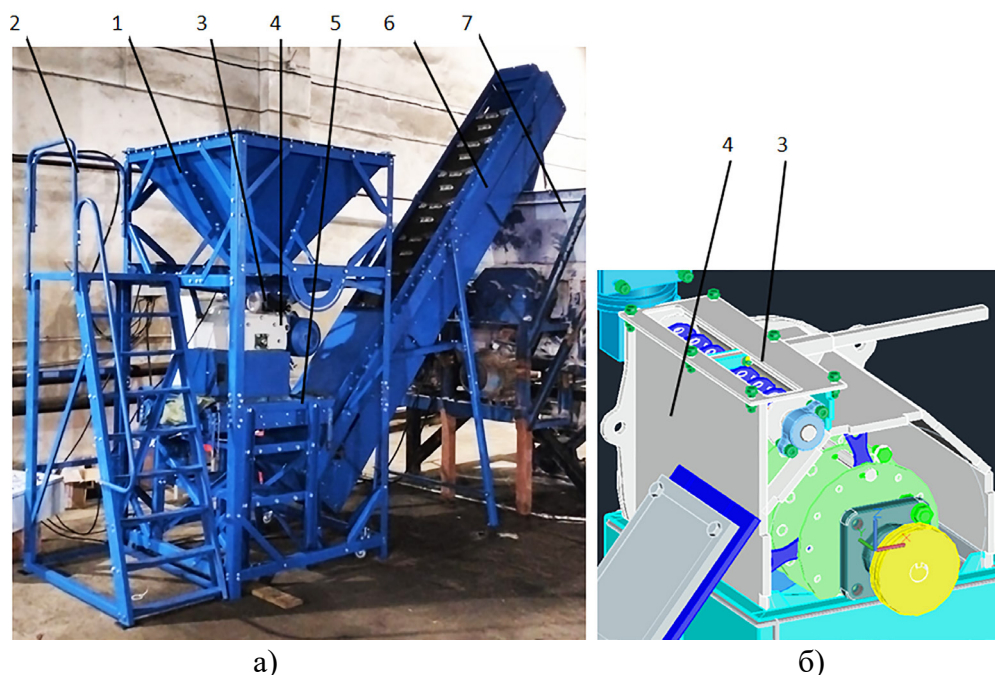
Линия включает бункер 1, смотровую площадку 2, питатель 3, дробилку 4, решетный сепаратор 5, транспортер 6, смеситель 7. Решето выполнено с продолговатыми отверстиями шириной 3 мм, расположенными длинной осью поперек движения частиц в камере.

Шнековый питатель представляет горизонтальный шнек диаметром 70 мм, расположенный в корпусе с загрузочным окном по образующей цилиндра. Для привода используется шаговый электродвигатель 17HS4401 Nema 17 42 BYGH 1.7A, управляемый при помощи ЭВМ [19].



- а) классическая схема с последовательно параллельной подготовкой компонентов;
 б) классическая схема с формированием предварительной смеси; в) прямоточная схема;
 1 – бункер исходных компонентов; 2 – дробилка; 3 – многокомпонентный весовой дозатор; 4 – порционный смеситель; 5 – питатель; 6 – бункер с добавками; 7 – бункер-накопитель; 8 – шнек-смеситель; 9 – однокомпонентный дозатор объемного типа; 10 – многокомпонентный дозатор объемного типа
 а) classical scheme with sequentially parallel preparation of components;
 б) classical scheme with the formation of a preliminary mixture; в) direct-flow scheme;
 1 – hopper of initial components; 2 – shredder; 3 – multicomponent weighing dispenser; 4 – batch mixer; 5 – feeder; 6 – hopper with additives; 7 – storage hopper; 8 – screw mixer; 9 – single-component volumetric dispenser; 10 – multi-component volumetric dispenser

Рисунок 2 – Технологические схемы производства комбикормов
Figure 2 – Technological schemes for the production of compound feeds



а) общий вид (general view);
 б) разрез модели измельчителя (section of the shredder model)

Рисунок 3 – Линия измельчения зерна
Figure 3 – Grain grinding line

Для управления работой шнекового питателя составлен программный код, представленный набором инструкций, показанных на рисунке 4.

Питатель шнековый состоит из корпуса, торцевых опор, одна из которых является креплением двигателя и шнека.

Вал шагового двигателя Nema 17 жестко соединен муфтой с валом шнека, который управляется программным кодом в среде Ардуино. При этом управляющий сигнал с компьютера подается на плату Arduino-Mega-2560, а далее сгенерированный сигнал управляет скоростью вращения питателя и соответственно подачей материала. Такое управление создает большие возможности точного регулирования величины подачи материала.

Результаты исследований и их обсуждение. В качестве выходных параметров определили производительность, удельную энергоемкость измельчителя и модуль помола материала.

Пробы для анализа отбирались согласно требованиям ГОСТ 13496.0–2016 «Комбикорма, комбикормовое сырье. Методы отбора проб». В исследованиях участвовали пшеница и овес.

Результаты исследований по энергоемкости представлены на рисунке 5; размеров дерти – на рисунке 6; модуля помола – на рисунке 7.

По данным рисунка 5, устойчивый диапазон изменения производительности находится в пределах от 240 до 2 050 кг/ч, как по пшенице, так и по овсу, при незначительном изменении энергоемкости для культур. При малой подаче зерна в измельчитель энергоемкость высока, что объясняется большой долей реактивных токов электромотора в общем объеме потребления электроэнергии. Увеличение загрузки камеры приводит к использованию в работе большей площади поверхности рабочих органов; электромотор загружается до номинального значения тока по обмоткам, при которых коэффициент полезного действия электромотора, и, соответственно, измельчителя становится наивысшим.

Так, оптимальная производительность варьирует в диапазоне значений от 1 400 до 1 900 кг/ч. При данных значениях имеем наибольшую энергоэффективность, составляющую от 1,8 до 3,2 кВт·ч/т, а также наличие запаса мощности электромотора.

```

#define dir_x 55
#define step_x 54
#define step_round 3200
int RPM = 1.1; //обороты в секунду, тогда от 1 до 5. от 60 до 300 об в минуту
int sp = 0;

void setup() {
  pinMode(dir_x, OUTPUT);
  pinMode(step_x, OUTPUT);
  sp = (1000000 / (step_round*2)) / RPM;
}

void loop() {
  moving(step_x, dir_x, sp, 1); //функция для запуска двигателя с регулировкой скорости
  //принимает как аргумент 4 значения: step_pin, dir_pin, скорость (переменная sp) и направление вращения (1, 0)
  // moving_delay(step_x, dir_x, sp, 1, 3200, 1000); //функция запуска двигателя с прерыванием
  //step_pin, dir_pin, скорость (переменная sp), направление вращения (1, 0), количество шагов шт, задержка миллисек

  // static uint32_t tmr2;
  // if (millis() - tmr2 > 50) {
  //   tmr2 = millis();
  //   RPM = map(analogRead(A4), 0, 1023, 0, 7);
  //   SPEED = 156 / RPM;
  // }

```

Рисунок 4 – Фрагмент программного кода управления работой двигателя питателя
Figure 4 – A fragment of the program code for controlling the operation of the feeder motor

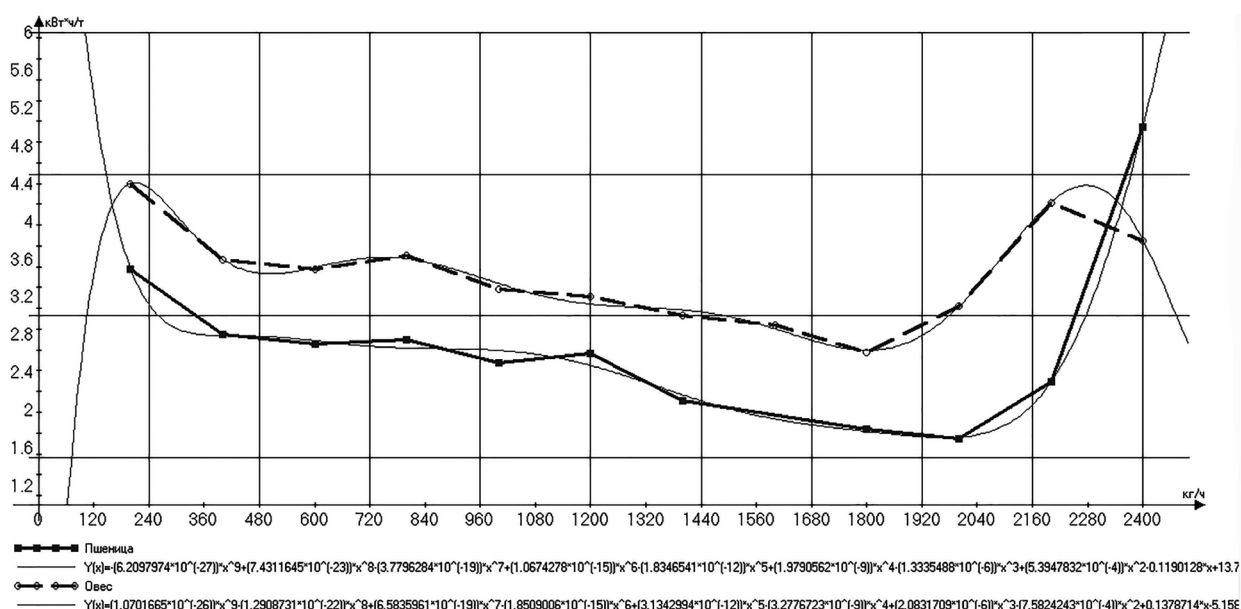


Рисунок 5 – Зависимость энергоемкости измельчения от производительности
Figure 5 – Dependence of the grinding energy consumption on productivity

Из анализа рисунков 6 и 7 видно, что с увеличением производительности увеличивается доля фракции до 1 мм и целых зерен, что объясняется большим количеством материала в камере, способствующим выходу целых зерен, и интенсивным переизмельчением мелкой фракции. При этом модуль помола в целом увеличивается, однако находится в пределах зоотехнических требований.

Заключение. 1. Экспериментальная проверка измельчителя в связке с питателем показала рекомендуемое значение

величины загрузки измельчителя в диапазоне от 1 400 до 1 900 кг/ч, при котором работа будет устойчивой с наименьшим количеством электроэнергии на единицу объема измельченного материала.

2. Повышение производительности молотковой дробилки ведет к увеличению модуля помола, что выражено криволинейной зависимостью. При исследуемых значениях производительности от 0,2 до 2,4 т/ч модуль помола составил от 1,95 до 2,27 мм, что соответствует зоотехническим требованиям.

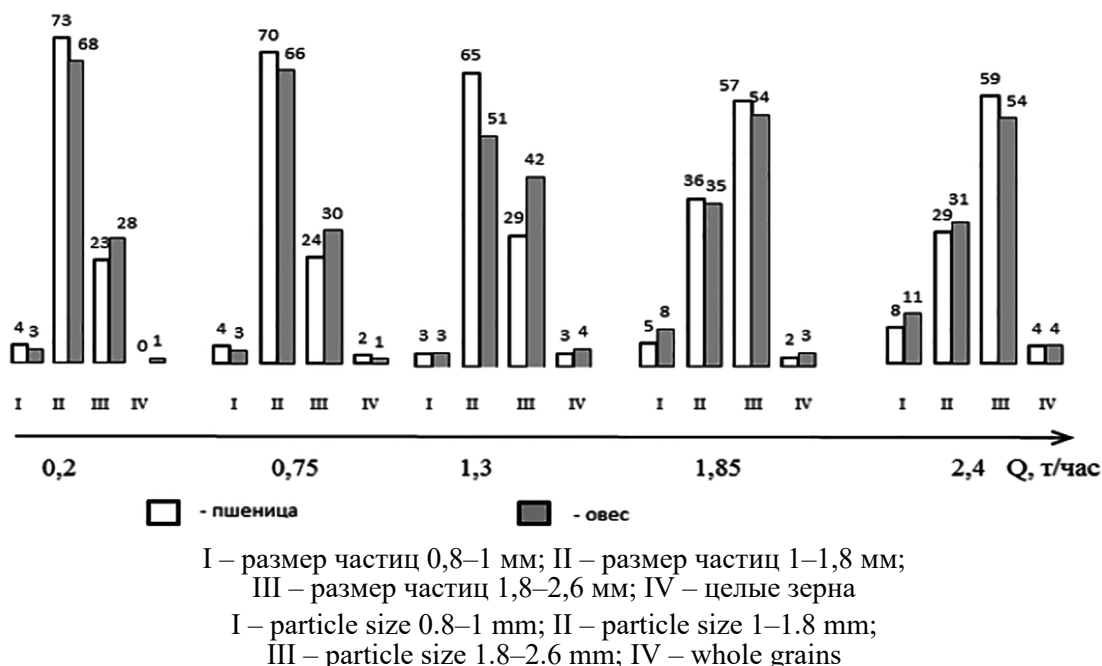


Рисунок 6 – Гистограмма распределения размеров дерти в зависимости от производительности дробилки
Figure 6 – Histogram of the groats size distribution depending on the shredder productivity

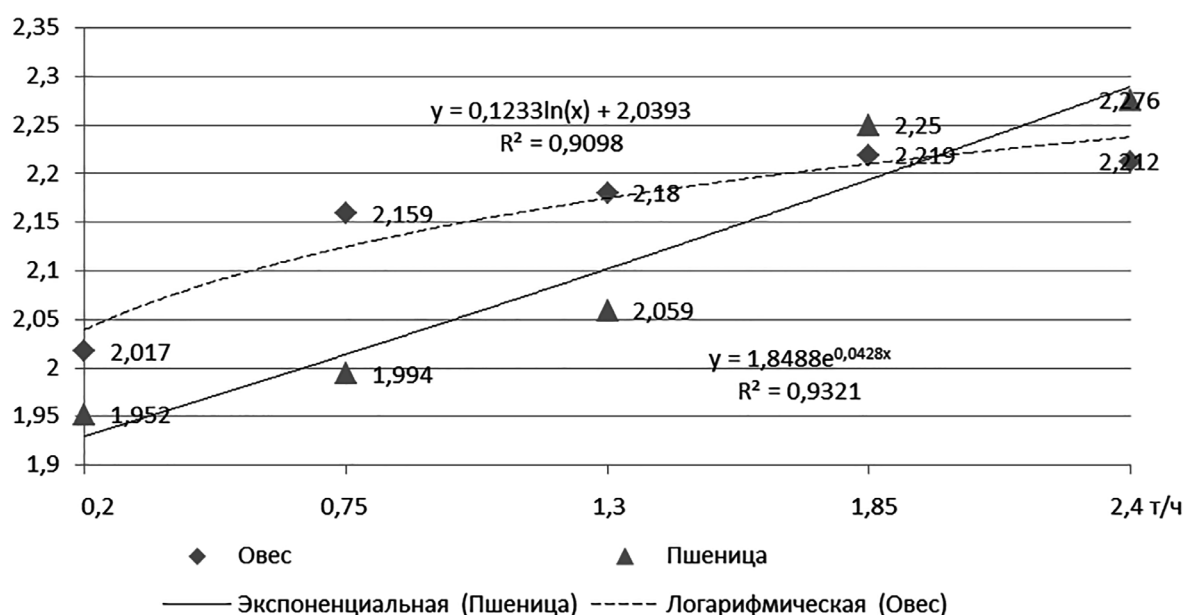


Рисунок 7 – Модуль помола в зависимости от производительности дробилки
Figure 7 – The grinding module depending on the shredder productivity

Список источников

1. Мельников С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. Ленинград : Колос, 1978. 560 с.
2. Федоренко В. Ф., Мишуrow Н. П., Гольяпин В. Я., Федоров А. Д., Чавыкин Ю. И., Сыроватка В. И. Методические рекомендации по технологическому проектированию предприятий по производству комбикормов. М. : Росинформагротех, 2015. 104 с. EDN UXMNDD.

3. Кукта Г. М. Машины и оборудование для приготовления кормов. М. : Агропромиздат, 1987. 303 с.
4. Федоренко И. Я. Технологические процессы и оборудование для приготовления кормов. М. : Форум, 2020. 176 с. EDN EMKWKH.
5. Hammer mills for optimum size reduction of raw material for pet food production // ANDRITZ. URL: <https://www.andritz.com/products-en/group/feed-biofuel/hammer-mills> (дата обращения: 10.09.2024).
6. Федоренко И. Я., Садов В. В. Структурная сложность технологической системы комбикормового цеха // АПК России. 2017. Т. 24. № 2. С. 437–442. EDN YUPJOR.
7. Князева Е. Н. Инновационная сложность: методология организации сложных адаптивных и сетевых структур // Философия науки и техники. 2015. Т. 20. № 2. С. 50–69. EDN VCVPGT.
8. Турубанов Н. В., Касьянов В. Л., Савиных П. А. Повышение эффективности молотковой дробилки зерна комбикормового агрегата путем совершенствования ее рабочих органов // Научные труды Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2010. Т. 21. № 3. С. 12–24. EDN NQTPGZ.
9. Коношин И. В., Булавинцев Р. А., Волженцев А. В., Башкирев А. П. Экспериментально-теоретическое исследование работы молотковой дробилки // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 9. С. 198–204. EDN YTASGD.
10. Садов В. В., Сорокин С. А. Повышение эффективности измельчения зерновых компонентов за счет оптимальной загрузки молотковой дробилки // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 3 (197). С. 100–106. EDN NVNXAU.
11. Нечаев В. Н. Изучение влияния конструктивных факторов лопаток ротора-вентилятора на показатели рабочего процесса дробилки // Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института. 2012. № 8 (15). С. 12–20. EDN PELDTR.
12. Orazbaev B. B., Orazbayeva K. N., Utenova B. E. Development of mathematical models and modeling of chemical engineering systems under uncertainty // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2014. Vol. 48. No. 2. P. 138–147. <https://doi.org/10.1134/S0040579514020092>. EDN SOGZGZ.
13. Lazanski T. J. Systems approach to a context dependent modelling of complex systems and a problem of validation // Academica Turistica. 2008. No. 1. P. 60–66.
14. Керимов М. А., Керимов М. М. Системный подход в проектировании измельчительных технологий // Системный анализ в проектировании и управлении : материалы XXV междунар. науч. и учеб.-практ. конф. СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет, 2021. С. 474–481. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id21-96>. EDN KQYKSL.
15. Бобков С. П., Астраханцева И. А., Галиаскаров Э. Г. Применение системного подхода при разработке математических моделей // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2021. № 1 (65). С. 66–71. EDN KOXZWY.
16. Kalinina A. E. Theoretical and methodological aspects in the development of information systems // Scientific and Technical Information Processing. 2008. Vol. 35. No. 1. P. 50–54. EDN OHGXSB.
17. Школьников П. Н., Кузнецов Е. Е., Щитов С. В. Снижение энергетических затрат при приготовлении и раздаче кормовых рационов // Энергосбережение и энергоэффективность: проблемы и решения : материалы IX всерос. (нац.) науч.-практ. конф. Нальчик : Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет, 2020. С. 184–189. EDN JGRJPA.
18. Спесивцев А. В., Павлов А. Н. Особенности выбора факторного пространства при оценивании и прогнозировании состояния сложного объекта // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2022. Т. 65. № 12. С. 920–924. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2022-65-12-920-924>. EDN RVXYTI.
19. Управление шаговым двигателем NEMA17 с помощью Arduino // YourDuino. URL: <https://www.yourduino.ru/blogs/blog/upravlenie-shagovym-dvigatелеm-nema17-s-pomoschyu-arduino> (дата обращения: 15.05.2024).

References

1. Melnikov S. V. *Mechanization and automation of animal farms*, Leningrad, Kolos, 1978, 560 p. (in Russ.).
2. Fedorenko V. F., Mishurov N. P., Goltyapin V. Ya., Fedorov A. D., Chavykin Yu. I., Syrovatka V. I. *Methodical recommendations on technological design of enterprises for mixed fodder production*, Moscow, Rosinformagrotekh, 2015, 104 p. EDN UXMNDD (in Russ.).
3. Kukta G. M. *Machinery and equipment for forage preparation*, Moscow, Agropromizdat, 1987, 303 p. (in Russ.).
4. Fedorenko I. Ya. *Technological processes and equipment for fodder preparation*, Moscow, Forum, 2020, 176 p. EDN EMKWKH (in Russ.).
5. Hammer mills for optimum size reduction of raw material for pet food production. *Andritz.com* Retrieved from <https://www.andritz.com/products-en/group/feed-biofuel/hammer-mills> (Accessed 10 September 2024).
6. Fedorenko I. Ya., Sadov V. V. The structural complexity of technological system of a compound feed mill. *APK Rossii*, 2017;24;2:437–442. EDN YUPJOR (in Russ.).
7. Knyazeva E. N. Innovative complexity: methodology of organization of complex adaptive and network structures. *Filosofiya nauki i tekhniki*, 2015;20;2:50–69. EDN VCVPGT (in Russ.).
8. Turubanov N. V., Kasyanov V. L., Savinykh P. A. Increase of efficiency of hammer crusher of grain of mixed fodder aggregate by improvement of its working bodies. *Nauchnye trudy Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*, 2010;21;3:12–24. EDN NQTPGZ (in Russ.).
9. Konoshin I. V., Bulavintsev R. A., Volzhentsev A. V., Bashkirev A. P. Experimental and theoretical study of hammer crusher operation. *Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*, 2018;9:198–204. EDN YTASGD (in Russ.).
10. Sadov V. V., Sorokin S. A. Increasing the grinding efficiency of grain components by optimal loading of the hammer crusher. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2021;3(197):100–106. EDN NVNXAU (in Russ.).
11. Nechaev V. N. Studying of influence of constructive factors of shovels of rotor-conditioner to the characteristics of crushing woring process. *Vestnik Nizhegorodskogo gosudarstvennogo inzhenerno-ehkonomicheskogo instituta*, 2012;8(15):12–20. EDN PELDTR (in Russ.).
12. Orazbaev B. B., Orazbayeva K. N., Utenova B. E. Development of mathematical models and modeling of chemical engineering systems under uncertainty. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2014;48;2:138–147. <https://doi.org/10.1134/S0040579514020092>. EDN SOGZGZ.
13. Lazanski T. J. Systems approach to a context dependent modelling of complex systems and a problem of validation. *Academica Turistica*, 2008;1:60–66.
14. Kerimov M. A., Kerimov M. M. Systematic approach in designing grinding technologies. *Proceedings from System analysis in design and management: XXV Mezhdunarodnaya nauchnaya i uchebno-prakticheskaya konferentsiya*. (PP. 474–481), Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet, 2021. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id21-96>. EDN KQYKSL (in Russ.).
15. Bobkov S. P., Astrakhantseva I. A., Galiaskarov E. G. Application of a system approach in developing mathematical models. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie*, 2021;1(65):66–71. EDN KOXZWW (in Russ.).
16. Kalinina A. E. Theoretical and methodological aspects in the development of information systems. *Scientific and Technical Information Processing*, 2008;35;1:50–54. EDN OHGXSB.
17. Shkolnikov P. N., Kuznetsov E. E., Shchitov S. V. Reducing energy costs for preparing and distributing feed rations. *Proceedings from Energy saving and energy efficiency: problems and solutions: IX Vserossiiskaya (natsional'naya) nauchno-prakticheskaya konferentsiya*. (PP. 184–189), Nal'chik, Kabardino-Balkarskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet, 2020. EDN JGRJPA (in Russ.).

18. Spesivtsev A. V., Pavlov A. N. Features of the choice of factor space in the estimation and prediction of the state of a complex object. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*, 2022;65;12:920–924. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2022-65-12-920-924>. EDN RVXYTI (in Russ.).

19. NEMA17 stepper motor control with Arduino. *Yourduino.ru* Retrieved from <https://www.yourduino.ru/blogs/blog/upravlenie-shagovym-dvigatelem-nema17-s-pomoschyu-arduino> (Accessed 15 May 2024) (in Russ.).

© Садов В. В., Сорокин С. А., 2024

Статья поступила в редакцию 31.10.2024; одобрена после рецензирования 15.11.2024; принята к публикации 26.11.2024.

The article was submitted 31.10.2024; approved after reviewing 15.11.2024; accepted for publication 26.11.2024.

Информация об авторах

Садов Виктор Викторович, доктор технических наук, доцент, Алтайский государственный аграрный университет, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0335-9436>, AuthorID: 427073, sadov.80@mail.ru;

Сорокин Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Алтайский государственный аграрный университет, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1016-6804>, AuthorID: 1108537, sorokin_sg@mail.ru

Information about the authors

Viktor V. Sadov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Altai State Agricultural University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0335-9436>, Author ID: 427073, sadov.80@mail.ru;

Sergey A. Sorokin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Altai State Agricultural University, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1016-6804>, Author ID: 1108537, sorokin_sg@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.