

4.3.1. ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 631.363:636.086.5

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2025_3_38

EDN: VICVVT

Обоснование конструктивных и режимных параметров дробилки с двумя типами рабочих органов

Юрий Васильевич Саенко^{1✉}, Марина Александровна Семернина²,
Владимир Юрьевич Страхов³

^{1, 2, 3} Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина,
п. Майский, Россия

¹ yuriy311300@mail.ru✉

Аннотация. Интенсификация животноводства требует решения проблемы обеспечения сельскохозяйственных животных и птицы полноценными качественными кормами. Одним из природных и доступных источников биологических компонентов (витаминов, микро- и макроэлементов) является пророщенное зерно, при добавлении которого в корм существенно повышается его поедаемость, у животных улучшается обмен веществ. Чтобы пророщенное зерно равномерно распределялось в комбикорме, его необходимо измельчить до размера комбикорма. Обоснована конструктивно-технологическая схема дробилки для измельчения пророщенного зерна, рабочая часть которой состоит из дробильной камеры цилиндрической формы с соосно размещенными внутри двумя барабанами. На внутреннем барабане шарнирно размещены ножи, а на внешнем – шарнирно установлены молотки. Первые предназначены для измельчения ростков, а вторые – для измельчения зерновок. Внешний и внутренний барабаны выполнены с возможностью вращения в одну сторону. Приведены выражения для определения энергоемкости процесса измельчения с учетом степени измельчения зерновки и ростка, а также массы зерновок и ростков в общей неизмельченной массе. В предложенной дробилке процесс измельчения протекает в двух кольцевых потоках – во внутреннем, в котором преимущественно находятся легкие ростки, и внешнем, в котором распределены более тяжелые зерновки. В результате проведенной оптимизации конструктивно-режимных параметров камеры измельчения с двумя типами рабочих органов получены трехмерные зависимости модуля помола: 1) от частоты вращения барабана, оснащенного ножами, и расстояния между ножами; 2) от частоты вращения барабана, оснащенного ножами, и угла заточки ножа; 3) от толщины молотков и частоты вращения барабана, оснащенного молотками. Определено, что при модуле помола, равном 1,0–1,25 мм, значения минимальной энергоемкости процесса измельчения находились в интервале 5,76–7,20 кВт ч/т, производительность установки составила 0,52–0,54 т/ч.

Ключевые слова: пророщенное зерно, измельчение, энергоемкость, дробление, резание, модуль помола
Для цитирования: Саенко Ю.В., Семернина М.А., Страхов В.Ю. Обоснование конструктивных и режимных параметров дробилки с двумя типами рабочих органов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2025. Т. 18, № 3(86). С. 38–47. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2025_3_38-47.

4.3.1. TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT FOR AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

Justification of the design and operating parameters of a fodder grinder with two types of working bodies

Yuri V. Saenko^{1✉}, Marina A. Semernina², Vladimir Yu. Strakhov³

^{1, 2, 3} Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin, Belgorod, Russia

¹ yuriy311300@mail.ru✉

Abstract. The intensification of animal husbandry requires solving the problem of providing farm animals and poultry with high-grade, high-quality feed. One of the natural and affordable sources of biological components (vitamins, micro- and macronutrients) is sprouted grain, which, when added to the feed, significantly increases its digestibility and improves the metabolism in animals. In order for the sprouted grain to be evenly distributed in the feed, it must be ground to the size of the feed. The design and technological scheme of a fodder grinder for sprouted grain milling, the working part of which consists of a cylindrical grinding chamber with two drums coaxially placed inside, is substantiated. Knives are pivotally mounted on the inner drum, and hammers are pivotally mounted on the outer drum. The first ones are designed for reducing sprouts to powder or small

fragments, and the second ones are for grinding kernels. The outer and inner drums are rotatable in one direction. Expressions are given for determining the energy intensity of the grinding process, taking into account the degree of kernels grinding and sprouts milling, as well as the mass of kernels and sprouts in the total non-ground mass. In the proposed feed grinder, the process runs in two annular streams – the inner one, which mainly contains light sprouts, and the outer one, in which heavier kernels are distributed. As a result of the optimization of the design and operating parameters of the grinding chamber with two types of working bodies, three-dimensional dependences of the grinding module were obtained: i) on the speed of rotation of the drum equipped with knives and the distance between the knives; ii) on the speed of rotation of the drum equipped with knives and the angle of cutting edge; iii) on the thickness of the hammers and the speed of rotation of the drum equipped with hammers. It was determined that with a grinding modulus of 1.0-1.25 mm, the values of the minimum energy intensity of the grinding process were in the range of 5.76-7.20 kWh/t, and the plant's capacity was 0.52-0.54 t/h.

Keywords: sprouted grain, milling, energy intensity, grinding, cutting, grinding module

For citation: Saenko Yu.V., Semernina M.A., Strakhov V.Yu. Justification of the design and operating parameters of a fodder grinder with two types of working bodies. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2025;18(3):38-47. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2025_3_38-47.

Интенсификация животноводства требует решения проблемы обеспечения сельскохозяйственных животных и птицы полноценными качественными кормами. В современных условиях промышленного ведения скотоводства и птицеводства рационы должны быть строго сбалансированы по питательным веществам, макро- и микроэлементам, витаминам и другим биологически активным компонентам, так как недостаток отдельных элементов питания вызывает снижение продуктивности животных, ухудшение их здоровья и репродуктивных качеств, приводя к значительному росту себестоимости получаемой продукции.

Одним из природных, достаточно простых и доступных источников эффективных биологических компонентов (витаминов, микро- и макроэлементов) является пророщенное зерно. При добавлении пророщенного зерна в корм существенно повышается его поедаемость, у животных улучшается обмен веществ. Для обогащения кормов подходит зерно таких злаковых культур, как рожь, пшеница, ячмень, овес [2, 10, 14, 16].

Однако пророщенное зерно из-за высокой влажности быстро портится, его необходимо либо сразу скармливать, либо высушивать и измельчать. Чтобы пророщенное зерно равномерно распределялось в комбикорме, его необходимо измельчить до размера комбикорма, а затем перемешать.

Известно, что пророщенная зерновая масса является неоднородной по своей структуре, состоящей из отдельных зерновок и ростков [12], имеющих различные физико-механические свойства (размер, форма, плотность) и структуру, причем зерновки, обладающие большей плотностью, измельчаются дроблением, а более мягкие ростки – резанием [13, 15]. С учетом этих особенностей в дробилке должно быть два типа рабочих органов – ножи и молотки [4, 5].

Для измельчения пророщенного зерна необходимо использовать устройство ударного действия, которое разделит пророщенное зерно на потоки, отличающиеся по плотности и массе частиц. После образования отдельных кольцевых потоков (внутреннее кольцо – поток ростков, внешнее кольцо – поток зерна) необходимо использовать различные способы измельчения, а именно удар для измельчения зерна и резание для измельчения ростков. Такой подход к измельчению позволит снизить нагрузку на рабочие органы и общую энергоемкость процесса.

Технологический процесс измельчения осуществляют последовательным протеканием отдельных операций. Заполняют бункер пророщенным зерном, затем открывают дозирующую заслонку и массу подают в центр дробильной камеры, внутри которой вращаются два барабана – внешний, на котором размещены молотки, и внутренний, на котором размещены ножи. При первом взаимодействии пророщенного зерна с внутренним барабаном, оснащенном ножами, происходит отрыв ростка от зерновки [15].

Вращающиеся барабаны создают поток воздуха, который направлен от центра к образующей дробильной камеры. Принимаем, что скорость потока воздуха V_M и начальная скорость полета частицы ростка и зерновки одинаковы. Однако зерновка тяжелее ростка, следовательно, она имеет большую кинетическую энергию, а росток – меньшую, поэтому зерновка переместится дальше от центра и будет взаимодействовать с молотками, а росток – ближе к центру и будет взаимодействовать с ножами [5, 6, 7, 8].

Чтобы определить кинетическую энергию, которую получит зерновка, обладая определенной начальной скоростью и массой, используем выражение

$$E_1 = \frac{m_1 v^2}{2}, \quad (1)$$

где m_1 – масса зерновки, кг;

v – скорость движения зерновки, м/с.

Чтобы определить кинетическую энергию, которую получит росток, обладая определенной начальной скоростью и массой, используем выражение

$$E_2 = \frac{m_2 v^2}{2}, \quad (2)$$

где m_2 – масса ростка, кг;

v – скорость движения ростка, м/с.

Для преодоления сопротивления воздуха в дробильной камере зерновке необходимо затратить энергию, которую определим по формуле

$$B_1 = F_1 h_1, \quad (3)$$

где F_1 – сила сопротивления воздуха движению зерновки, Н;

h_1 – наибольшее расстояние, на которое перемещается зерновка, м.

Для преодоления сопротивления воздуха в дробильной камере ростку необходимо затратить энергию, которую определим по формуле

$$B_2 = F_2 h_2, \quad (4)$$

где F_2 – сила сопротивления воздуха движению ростка, Н;

h_2 – наибольшее расстояние, на которое перемещается росток, м.

С учетом неравенства масс $m_1 > m_2$ $E_1 > E_2$.

Сила сопротивления воздушному потоку пропорциональна проекции сечения частицы, которая перпендикулярна воздушному потоку. Так как фронтальная площадь поверхности ростка больше фронтальной площади поверхности зерновки ($F_2 > F_1$), $F_1 h_1 > F_2 h_2$. Из неравенства выразим значение h_1 – расстояние, на которое может переместиться зерновка, используя следующую формулу:

$$h_1 > \frac{F_2 h_2}{F_1}. \quad (5)$$

Расстояние, которое пройдет зерновка до взаимодействия с молотком, больше расстояния, которое пройдет росток до взаимодействия с ножом: $h_1 > h_2$.

Проанализировав вышеизложенное, можно сделать следующий вывод: так как масса зерновки превышает массу ростка, а фронтальная площадь поверхности зерновки меньше площади ростка, то зерновка, обладающая большей кинетической энергией, будет перемещаться ближе к образующей дробильной камеры, т.е. слой зерновок будет располагаться внешним кольцом, а ростки, обладающие меньшей кинетической энергией, будут находиться ближе к центру дробильной камеры и образовывать внутреннее кольцо. Следовательно, в одной камере ножи для измельчения ростков необходимо закрепить на внутреннем барабане, а молотки для дробления зерновок – на внешнем [6, 7, 8].

Целью проведенного исследования является выявление в аппарате резания взаимосвязи между модулем помола и углом заточки лезвия ножа, расстоянием между ножами и частотой вращения ножевого барабана, а в дробильном аппарате – между модулем помола и частотой вращения дробильного барабана, толщиной молотка и диаметром барабана [9, 10, 12], а также определение энергоемкости измельчения пророщенного зерна и пропускной способности дробилки.

Для реализации программы исследования была разработана конструкция дробилки, у которой внутри одной камеры измельчения расположены два типа рабочих органов – ножи и молотки, которые размещены на двух барабанах. Барабан большего диаметра оснащен молотками, а меньшего диаметра – ножами. Дробильная камера изображена на рисунке 1 [13].

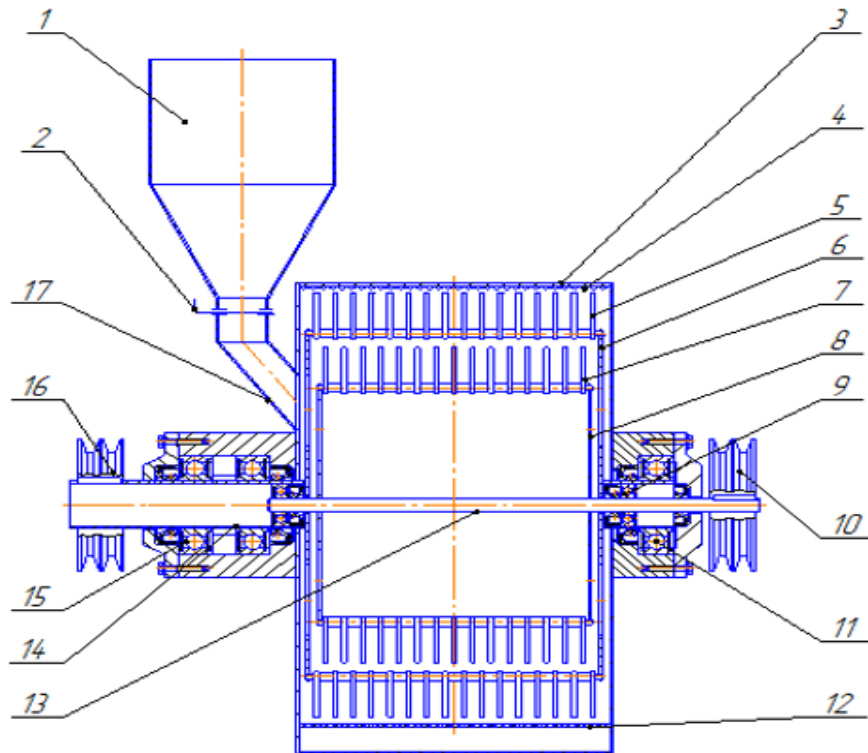


Рис. 1. Дробильная камера: 1 – бункер; 2 – заслонка; 3 – камера дробильная; 4 – дека; 5 – молоток; 6 – дробильный барабан с молотками; 7 – нож; 8 – барабан с ножами; 9 – внутренний подшипник; 10 – шкив; 11 – внешний подшипник; 12 – решет; 13 – вал внутренний; 14 – вал внешний; 15 – подшипник внешний; 16 – шкив; 17 – направляющая

Экспериментальный образец дробилки пророщенного зерна представлен на рисунке 2.

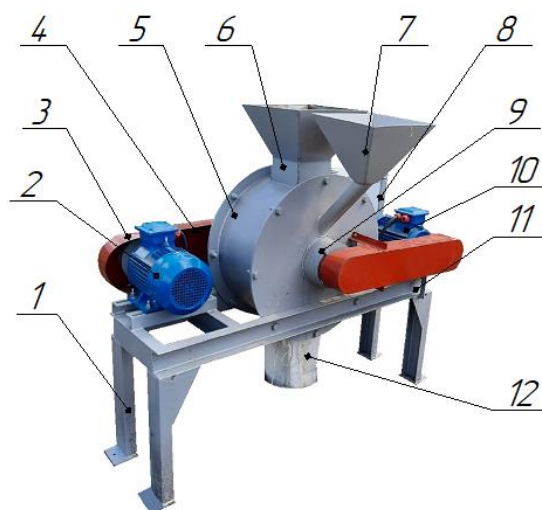


Рис. 2. Экспериментальная дробилка пророщенного зерна:
1 – опора; 2 – электродвигатель для привода внешнего барабана; 3 – кожух защитный;
4 – передача ременная; 5 – камера дробильная; 6 – бункер центральный; 7 – бункер боковой;
8 – пульт включения/выключения; 9 – корпус подшипников; 10 – электродвигатель для привода внутреннего барабана; 11 – рама; 12 – рукав для разгрузки

Схема управления предложенной дробилкой пророщенного зерна представлена на рисунке 3.

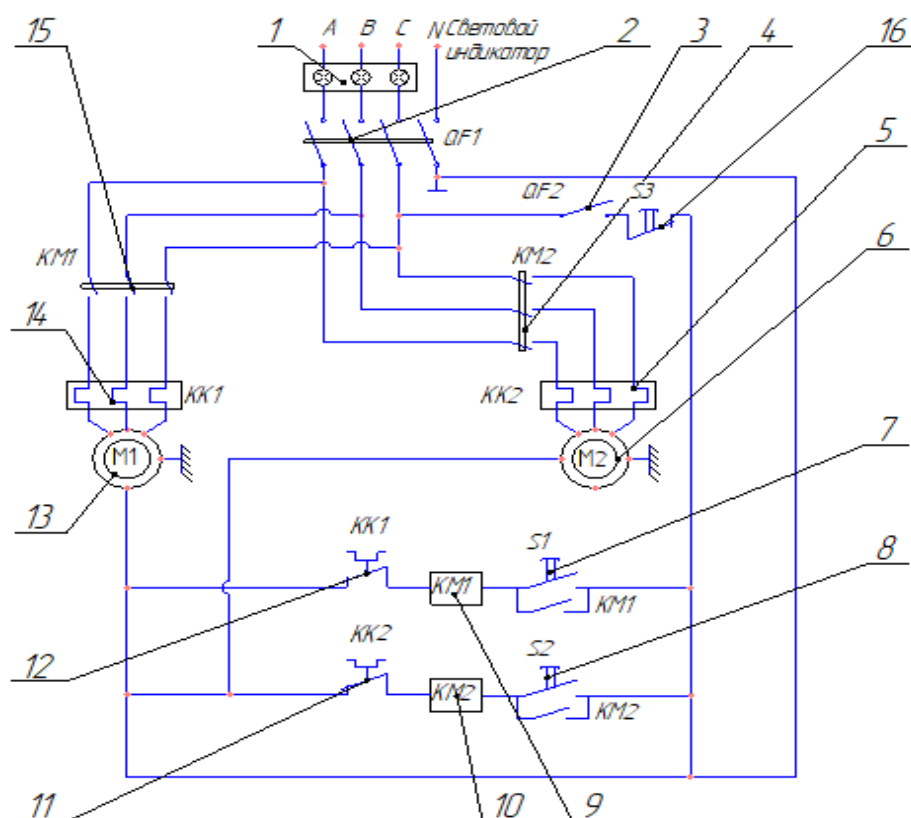


Рис. 3. Схема управления дробилкой пророщенного зерна:

1 – световой индикатор; 2, 3 – пакетные выключатели; 4, 15 – контакторы; 5, 14 – тепловые реле; 6, 13 – электродвигатели; 7, 8 – контакты; 9, 10 – катушки; 11, 12 – контакты; 16 – контакты

Работа дробилки осуществляется следующим образом. Включают один электродвигатель и дают возможность поработать тридцать-сорок секунд, после этого включают другой электродвигатель. Один двигатель приводит во вращение внутренний барабан, оснащенный ножами, а другой – внешний барабан, оснащенный молотками. Во время работы вхолостую (2–3 минуты) слушают, чтобы не было посторонних звуков. Затем в боковой бункер подают высушенное пророщенное зерно и открывают дозирующую заслонку. После того как пророщенное зерно попадает в центр камеры измельчения, происходит отделение ростков от зерновок. Ростки и зерновки подхватываются потоком воздуха и начинают двигаться по направлению от центра к периферии. Для измельчения зерновок предназначены молотки, а для измельчения ростков – ножи. Конечный размер частиц задают при помощи сменного решета.

Оценивать работу предложенной дробилки можно по модулю помола и энергоемкости процесса измельчения [4, 9, 12].

Модуль помола определим следующим образом:

$$M = (d_1 p_1 + d_2 p_2 + \dots + d_n p_n) / 100, \quad (6)$$

где d_1 – средний размер отверстий решета, мм;

p_n – измельченная масса на решете.

Для кормления птицы или животных различных половозрастных групп размер частиц корма отличается. Поэтому конечный размер частиц пророщенного зерна после измельчения должен соответствовать рекомендуемой фракции корма. Чтобы получить заданный размер частиц, применяют съемные решета.

Общая мощность измельчения пророщенного зерна является суммой мощностей, которые необходимы для измельчения массы каждого слоя [17, 18]. Общую мощность представим в виде выражения

$$N_{\text{изм}} = N_{1\text{изм}} + N_{2\text{изм}}, \quad (7)$$

где $N_{1\text{изм}}$ – мощность, затрачиваемая на измельчение массы во внешнем кольцевом слое молотками, кВт;

$N_{2\text{изм}}$ – мощность, затрачиваемая на измельчение массы во внутреннем кольцевом слое ножами, кВт.

Чтобы определить мощность, необходимую для измельчения массы во внешнем кольцевом слое молотками, применим выражение

$$N_{1\text{изм}} = q_1 A_{1\text{изм}}, \quad (8)$$

где q_1 – пропускная способность во внешнем слое, кг/сек;

$A_{1\text{изм}}$ – удельная работа на измельчение зерновок в слое молотков, Дж/кг.

Мощность, необходимую для измельчения массы во внутреннем кольцевом слое ножами, определим по выражению

$$N_{2\text{изм}} = q_2 A_{2\text{изм}}, \quad (9)$$

где q_2 – пропускная способность во внутреннем слое, кг/сек;

$A_{2\text{изм}}$ – удельная работа на измельчение ростков в слое ножей, Дж/кг.

Учитывая потери мощности на сопротивление воздуха, полную мощность на привод дробилки можно определить по выражению

$$N = (1,15 \dots 1,20) N_{\text{изм}}. \quad (10)$$

Энергоемкость процесса с учетом степени измельчения может быть определена как сумма энергоемкостей в отдельных слоях продукта.

$$\mathcal{E}_n = \mathcal{E}_{n1} + \mathcal{E}_{n2}, \quad (11)$$

где \mathcal{E}_{n1} – энергоемкость измельчения во внешнем кольцевом слое, кВт·ч/т;

\mathcal{E}_{n2} – энергоемкость измельчения во внутреннем кольцевом слое, кВт·ч/т.

$$\mathcal{E}_{n1} = N_{1\text{изм}} / (q_1 \lambda_1). \quad (12)$$

где λ_1 – степень измельчения зерновок.

$$\mathcal{E}_{n2} = N_{2\text{изм}} / (q_2 \lambda_2). \quad (13)$$

где λ_2 – степень измельчения ростков.

$$\mathcal{E}_n = \frac{N}{Q} \left(\frac{1}{\mu_1 \lambda_1} + \frac{1}{\mu_2 \lambda_2} \right), \quad (14)$$

где $\mu_{ц1}$ – масса зерновок в общей массе, кг/кг;

$\mu_{ц2}$ – масса ростков в общей массе, кг/кг.

Экспериментальные исследования выполняли с учетом ортогональной матрицы планирования эксперимента. В таблице 1 представлены факторы, которые оказывают влияние на модуль помола на внутреннем барабане.

Таблица 1. Факторы, влияющие на модуль помола пророщенного зерна на внутреннем барабане

Обозначение	Наименование фактора	Уровни варьирования факторов		
		–1	0	+1
X_1	Угол заточки лезвия ножа γ_n , °	10	20	30
X_2	Расстояние между ножами a , мм	7	14	21
X_3	Частота вращения ножевого барабана n_n , мин ^{–1}	2000	2500	3000

После обработки полученных экспериментальных значений получили уравнения регрессии, которые оказывают влияние на модуль помола при измельчении внутренним барабаном.

Уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$M_{\text{П}} = 1,077 - 0,00085n_{\text{Н}} + 0,033b_{\text{Н}} + 0,1\gamma_{\text{Н}} + 0,0000002n_{\text{Н}}^2 - 0,0000038\omega_{\text{б}}b_{\text{Н}} - 0,000017\omega_{\text{б}}\gamma_{\text{Н}} + 0,001b_{\text{Н}}^2 - 0,001b_{\text{Н}}\gamma_{\text{Н}} - 0,0011\gamma_{\text{Н}}^2. \quad (15)$$

Для указанного уравнения регрессии коэффициент корреляции $R = 88,52\%$.

Адекватность представленного уравнения определяли по критерию Фишера, при этом установили, что $F_{\text{р}} = 9,427 > F_{\text{табл}} = 2,95$. Приведенные сравнения расчетного и табличного значения критерия Фишера указывают, что полученные данные достоверны, коэффициенты уравнения регрессии значимы, а модель адекватна [1, 3, 19, 20].

Выполнив оптимизацию уравнения регрессии (15), определили, что модуль помола пророщенного зерна после внутреннего барабана, на котором закреплены ножи, составляет 1,25–1,30 мм при обеспечении следующих условий:

- угол заточки лезвия ножа $\gamma_{\text{Н}} - 14-15^\circ$;
- частота вращения ножевого барабана $n_{\text{Н}} - 2820-2840 \text{ мин}^{-1}$;
- расстояние между ножами $b_{\text{Н}} - 12-14 \text{ мм}$.

В результате выполненных расчетов конструктивно-режимных параметров камеры измельчения с двумя типами рабочих органов получены трехмерные зависимости модуля помола:

- 1) от частоты вращения барабана, оснащенного ножами, и расстояния между ножами;
- 2) от частоты вращения барабана, оснащенного ножами, и угла заточки ножа;
- 3) от толщины молотков и частоты вращения барабана, оснащенного молотками.

Анализ первой трехмерной зависимости показал, что после измельчения внутренним барабаном с размещенными на нем ножами модуль помола находится в интервале от 1,0 до 1,4 мм, расстояние между соседними ножами составляет 7–15 мм и частота вращения барабана – 2200–3000 мин^{-1} . Если частоту вращения барабана снизить, то модуль помола увеличится до 1,6–1,7 мм. Эти значения выше, чем рекомендованный модуль помола, который находится в интервале 0,9–1,4 мм.

Анализ второй трехмерной зависимости показал, что модуль помола находится в интервале от 1,0 до 1,3 мм при обеспечении следующих условий:

- угол заточки лезвия ножа $\gamma_{\text{Н}} - 12-16^\circ$,
- частота вращения ножевого барабана $n_{\text{Н}} - 2200-3000 \text{ мин}^{-1}$.

Если угол заточки ножа увеличить (например, до 18°), то это повлечет за собой увеличение модуля помола зерновой массы больше рекомендованного значения, находящегося в интервале 0,9–1,4 мм.

В таблице 2 отмечены факторы, которые оказывают влияние на модуль помола пророщенного зерна при измельчении внешним барабаном.

Таблица 2. Факторы, влияющие на модуль помола пророщенного зерна при измельчении внешним барабаном

Обозначение	Наименование фактора	Уровни варьирования факторов		
		–1	0	+1
X_1	Частота вращения дробильного барабана $n_{\text{д}}$, мин^{-1}	2000	2500	3000
X_2	Толщина молотка $h_{\text{м}}$, м	0,002	0,003	0,004
X_3	Диаметр барабана $D_{\text{б}}$, м	0,6	0,65	0,7

Выполнив обработку полученных экспериментальных значений, получили уравнения регрессии, которые оказывают влияние на модуль помола при измельчении внешним барабаном.

Уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$M_{П2} = -19,48 + 0,0007n_{д} + 9,97h_{м} + 0,57D_{б} + 0,0000002n_{д}^2 - 0,00028n_{д}h_{м} - 0,000065n_{д}D_{б} + 4,76h_{м}^2 - 0,15h_{м}D_{б} - 0,003D_{б}^2. \quad (16)$$

Для указанного уравнения регрессии коэффициент корреляции $R = 87,27\%$.

Адекватность представленного уравнения определяли по критерию Фишера, при этом определили, что $F_p = 8,38 > F_{табл} = 2,95$. Приведенные сравнения расчетного и табличного значения критерия Фишера указывают, что результаты проведенных исследований достоверны, коэффициенты уравнения регрессии значимы, а модель адекватна [1, 3, 19, 20].

Выполнив оптимизацию уравнения регрессии (16), определили, что модуль помола пророщенного зерна после внешнего барабана, на котором закреплены молотки, находится в интервале 1,2–1,3 мм при обеспечении следующих условий:

- диаметр барабана $D_{б} - 0,60-0,62$ м;
- частота вращения дробильного барабана $n_{д} - 2550-2580$ мин⁻¹;
- толщина молотка $h_{м} - 0,002-0,003$ м.

Анализ третьей трехмерной зависимости показал, что после измельчения пророщенного зерна молотками наименьший модуль помола находится в интервале от 1 до 1,2 мм, если обеспечить толщину молотков 2–3 мм и частоту вращения барабана, оснащенного молотками, от 2200 до 2650 мин⁻¹. При увеличении толщины молотков и уменьшении частоты вращения барабана модуль помола будет возрастать свыше рекомендованных значений 0,9–1,4 мм.

Выводы

Пророщенная зерновая масса является неоднородной по своей структуре, состоящей из отдельных зерновок и ростков, имеющих различные физико-механические свойства (размер, форма, плотность) и структуру. Разделение массы на два кольцевых потока возможно за счет разницы плотности и площади поверхности зерновки и ростка. Для измельчения зерновки используют молотки, которые смонтированы на внешнем барабане, а для измельчения ростка – ножи, которые смонтированы на внутреннем барабане.

В результате выполненных расчетов конструктивно-режимных параметров камеры измельчения с двумя типами рабочих органов установили:

- модуль помола пророщенного зерна после внутреннего барабана находится в интервале 1,25–1,30 мм при соблюдении следующих условий: угол заточки лезвия ножа $\gamma_n - 14-15^\circ$; частота вращения ножевого барабана $n_n - 2820-2840$ мин⁻¹; расстояние между ножами $b_n - 12-14$ мм;
- модуль помола пророщенного зерна после измельчения внешним барабаном находится в интервале 1,2–1,3 мм при соблюдении следующих условий: диаметр барабана $D_{б} - 0,60-0,62$ м; частота вращения дробильного барабана $n_{д} - 2550-2580$ мин⁻¹; толщина молотка $h_{м} - 0,002-0,003$ м.

Энергоемкость измельчения пророщенного зерна при использовании предложенной дробилки составила 5,76–7,20 кВт ч/т, модуль помола – 1,0–1,25 мм.

Пропускная способность дробилки составила 0,52–0,54 т/ч при соблюдении следующих условий: частота вращения внутреннего барабана с ножами – 2600–2850 мин⁻¹, частота вращения внешнего барабана с молотками – 2200–2600 мин⁻¹.

Список источников

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва: Наука, 1976. 278 с.
2. Бахарев Г.Ф., Дронова Л.И., Емельянова Л.Н. Исследование процесса суточного проращивания зерна на корм животным // Достижения науки и техники в АПК. 2007. № 1. С. 30–31.
3. Блинова Е.И. Планирование и организация эксперимента. Минск: БГТУ, 2010. 130 с.
4. Вендин С.В., Саенко Ю.В. Измельчение пророщенного зерна для приготовления кормовых смесей. Москва; Белгород: Центральный коллектор библиотек «БИБКОМ», 2017. 137 с.
5. Вендин С.В., Саенко Ю.В. К расчету конструктивных параметров ножей для измельчения пророщенного зерна // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2018. № 1. С. 16–31.
6. Гулевский В.А., Вертий А.А. Математическое моделирование работы измельчителя кормов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 3(58). С. 120–129. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2018.3.120.
7. Гулевский В.А., Вертий А.А. Усовершенствование технологии измельчения грубых стебельчатых кормов измельчителем с шарнирно подвешенными комбинированными ножами // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2019. Т. 12, № 1(60). С. 73–81. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2019.1.73.
8. Гулевский В.А., Шацкий В.П. Краткий курс теоретической механики: учебное пособие. Воронеж: Воронежский ГАУ, 2009. 178 с.
9. Злочевский В.Л., Борисов А.П. Исследование прочностных свойств зерновых материалов. Санкт-Петербург: Лань, 2017. 180 с.
10. Ковригин А.В., Вендин С.В., Саенко Ю.В. Повышение продуктивности свиней за счет скармливания им пророщенного зерна: монография. Белгород: Политекра, 2020. 189 с.
11. Кунце В. Технология солода и пива; пер. с нем. Санкт-Петербург: Профессия, 2001. 153 с.
12. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. Ленинград: Колос, 1978. 560 с.
13. Пат. 2692559 Рос. Федерация. Дробильная установка пророщенного высушенного зерна. С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, К.В. Казаков и др. № 2018135786; заявл. 09.10.2018; опубл. 25.06.2019. Бюл. № 18. 13 с.
14. Походня Г.С. Свиноводство и технология производства свинины: сборник научных трудов научной школы профессора Г.С. Походни. Специальный выпуск 2: Использование пророщенного зерна в рационах свиней. Белгород: Политекра, 2009. 68 с.
15. Резник Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. Москва: Машиностроение, 1975. 311 с.
16. Саенко Ю.В., Булавин С.А., Вендин С.В. Технологическая линия для подготовки корма из пророщенного зерна // Техника в сельском хозяйстве. 2013. № 6. С. 14–16.
17. Труфанов В.В., Дружинин Р.А., Скурятин Н.Ф. и др. Математическая модель удельной энергоемкости процесса измельчения зерна // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2012. № 2. С. 129–131.
18. Федоренко И.Я., Левин А.М. Энергетические соотношения при ударном измельчении зерна // Механизация и электрификация. 2002. № 11. С. 32–33.
19. Хайлис Г.А., Ковалев М.М. Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных. Москва: Колос, 1994. 169 с.
20. Юдин Ю.В., Майсурадзе М.В., Водолазский Ф.В. Организация и математическое планирование эксперимента. Екатеринбург: Уральский университет, 2018. 124 с.

References

1. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovsky Yu.V. Experiment planning while searching for optimal conditions. Moscow: Nauka Publishers; 1976. 278 p. (In Russ.).
2. Bakharev G.F., Dronova L.I., Emelianova L.N. Investigation of the process of daily germination of grain for animal feed. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2007;1:30-31. (In Russ.).
3. Blinova E.I. Planning and organization of the experiment. Minsk: Belarusian State Technological University Publishers; 2010. 130 p. (In Russ.).
4. Vendin S.V., Saenko Yu.V. Grinding of sprouted grain for the preparation of feed mixtures. Moscow; Belgorod: BIBKOM Central Library Collector Publishers; 2017. 137 p. (In Russ.).

5. Vendin S.V., Saenko Yu.V. To calculation of constructive parameters of knives for milling the propelled grain. *Innovations in Agricultural Complex: problems and perspectives*. 2018;1:16-31. (In Russ.).
6. Gulevsky V.A., Vertij A.A. Mathematical modeling of forage cutter operation. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2018;3:120-129. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2018.3.120. (In Russ.).
7. Gulevsky V.A., Vertij A.A. Improvements of technology of rough stalk forage grinding by chopper equipped with free-swinging combined knives. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2019;12(1):73-81. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2019.1.73. (In Russ.).
8. Gulevsky V.A., Shatsky V.P. A short course in theoretical mechanics: study guide. Voronezh: Voronezh State Agrarian University Publishers; 2009. 178 p. (In Russ.).
9. Zlochevsky V.L., Borisov A.P. Investigation of the strength properties of grain materials. Saint Petersburg: Lan' Publishers; 2017. 180 p. (In Russ.).
10. Kovrigin A.V., Vendin S.V., Saenko Yu.V. Increasing the productivity of pigs by sprouted grain feeding: monograph. Belgorod: Politerra Publishers; 2020. 189 p. (In Russ.).
11. Kuntze W. Malt and Beer Technology: translated from German. Petersburg: Professiya Publishers; 2001. 153 p. (In Russ.).
12. Melnikov S.V. Mechanization and automation of livestock farms. Leningrad: Kolos Publishers; 1978. 560 p. (In Russ.).
13. Patent 2692559 Russian Federation. Dried sprouted grain grinder. S.V. Vendin, Yu.V. Saenko, K.V. Kazakov et al. No. 2018135786, claimed 09.10.2018; published 25.06.2019. Bulletin 18. 13 p. (In Russ.).
14. Pohodnya G.S. Pig breeding and pork production technology: Collection of research papers of the Scientific School of Professor G.S. Pokhodnya. Special Issue 2: The use of sprouted grain in the diets of pigs. Belgorod: Politerra Publishers; 2009. 68 p. (In Russ.).
15. Reznik N.E. The theory of cutting with cutting tool edge and the basis of calculation of cutting devices. Moscow: Mashinostroenie Publishers; 1975. 311 p. (In Russ.).
16. Saenko Yu.V., Bulavin S.A., Vendin S.V. Technological line for preparation of feed from sprouted grain. *Machinery in agriculture*. 2013;6:14-16. (In Russ.).
17. Trufanov V.V., Druzhinin R.A., Skuryatin N.F. et al. Mathematical model of energy density of grain grinding process. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2012;2:129-131. (In Russ.).
18. Fedorenko I.Ya., Levin A.M. Energy ratios during impact grinding of grain. *Mechanization and electrification*. 2002;11:32-33. (In Russ.).
19. Khailis G.A., Kovalev M.M. Research of agricultural machinery and processing of experimental data. Moscow: Kolos Publishers; 1994. 169 p. (In Russ.).
20. Yudin Yu.V., Majsuradze M.V., Vodolazsky F.V. Organization and mathematical planning of the experiment. Yekaterinburg: Ural University Publishers; 2018. 124 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Ю.В. Саенко – доктор технических наук, профессор кафедры машин и оборудования в агробизнесе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина», yuriy311300@mail.ru.

М.А. Семернина – кандидат технических наук, преподаватель кафедры математики, физики и информатики ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина», semernina_ma@bsaa.edu.ru.

В.Ю. Страхов – кандидат технических наук старший преподаватель кафедры электрооборудования и электротехнологий в АПК ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина», strakhov_vy@bsaa.edu.ru.

Information about the authors

Yu.V. Saenko, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Machinery and Equipment in Agribusiness, Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin, yuriy311300@mail.ru.

M.A. Semernina, Candidate of Engineering Sciences, Lecturer, the Dept. of Mathematics, Physics and Computer Science, Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin, semernina_ma@bsaa.edu.ru.

V.Yu. Strakhov, Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer, the Dept. of Electrical Equipment and Electrical Technologies in Agro-Industrial Complex, Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin, strakhov_vy@bsaa.edu.ru.

Статья поступила в редакцию 20.04.2025; одобрена после рецензирования 23.06.2025; принята к публикации 03.07.2025.

The article was submitted 20.04.2025; approved after reviewing 23.06.2025; accepted for publication 03.07.2025.

© Саенко Ю.В., Семернина М.А., Страхов В.Ю., 2025