

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 631.363.21

И.Я. Федоренко
I.Ya. Fedorenko

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КОРМОВОГО ЗЕРНА

METHODOLOGICAL ASPECTS OF EXPERIMENTAL OPTIMIZATION OF FEEDING GRAIN GRINDING

Ключевые слова: кормовое зерно, дерть, измельчение, удельные затраты энергии, степень измельчения, оптимизация, критерии оптимальности, факторы процесса, компьютерная программа.

Самый напряженный режим измельчителя фуражного зерна связан с приготовлением дерти для молодняка свиней, поскольку регламентирующие документы требуют для этого случая мелкий размол зерна, отсутствие в дерти целых зерен и мучнистой фракции, определенную выравненность дерти по размерам составляющих частиц. Оптимизацию процесса измельчения предлагается проводить именно при реализации режима приготовления дерти для молодняка свиней, независимо от типа рабочих органов. Это позволит получать сопоставимые данные и сравнивать измельчители между собой. Установлено, что корректную, с математической точки зрения, оптимизацию нужно проводить, используя метод главного критерия для энергоёмкости собственно процесса измельчения, при этом другие критерии оптимальности необходимо переводить в ограничения. Методологические предложения по оптимизации процесса измельчения кормового зерна реализованы в компьютерной программе на базе среды

Mathcad 15, при этом проведен анализ конкретных экспериментальных данных.

Keywords: feeding grain, groats, grinding, unit energy costs, grinding degree, optimization, optimality criteria, process factors, software.

The heaviest mode of feeding grain grinding is associated with the preparation of groats for young pigs as the regulatory documents require for this case a fine grinding of grain, the absence of whole grains in the groats and mealy fraction, and a certain alignment of the groats by the particle size. The optimization of the grinding process is proposed to be carried out precisely in the implementation of the mode of groats making for young pigs regardless of the type of working bodies. This will allow obtaining comparable data and compare the grinders with each other. It has been found that correct, from a mathematical point of view, optimization should be carried out using the main criterion method for the energy intensity of the grinding process itself, and other criteria of optimality should be translated into restrictions. Methodological proposals to optimize the process of grinding feeding grain are implemented in a software application based on the *Mathcad 15* environment.

Федоренко Иван Ярославович, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: ijfedorenko@mail.ru.

Fedorenko Ivan Yaroslavovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: ijfedorenko@mail.ru.

Введение

Оптимизация на основе экспериментов, представляющая поиск наилучшего решения, сопровождается разработку или модернизацию любого сложного технологического процесса. Процесс измельчения кормового зерна не является исключением. Практически в любой дис-

сертационной работе, посвященной исследованию новых или модернизированных рабочих органов для измельчения зерна, ставится задача поиска их оптимальных или рациональных параметров. Вместе с тем обзор выполненных за последние годы диссертаций показывает, во-первых, множество подходов, которое не всегда

оправдано с технологической и математической точек зрения. Во-вторых, часто игнорируется многокритериальный характер процесса измельчения, ограничения в виде требований ГОСТов или иных регламентирующих документов, а также требования зоотехнического порядка.

В результате представляются результаты, которые грешат методической неполнотой, несопоставимостью между собой и с достигнутым уровнем техники и технологии измельчения зерна. Видимо, пришло время унифицировать процесс поиска оптимальных (рациональных) решений процесса измельчения кормового зерна. Это весьма важно для магистерских и аспирантских работ, поскольку их авторы делают первые шаги в науке и испытывают огромные трудности при необходимости оптимизации такого сложного процесса как измельчение кормового зерна.

Цель – обосновать методологические подходы при исследовании процесса измельчения фуражного зерна и его оптимизации по критериям энергосбережения и качества получаемого продукта.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования в данном случае является процесс измельчения кормового зерна; **предмет** исследования – оптимизация названного процесса.

Решению задачи оптимизации предшествует ряд процедур [1], из которых наибольшее значение имеют:

- выбор критерия (или критериев) оптимальности и управляемых переменных (факторов);
- введение ограничений и допущений;
- разработка плана эксперимента и его осуществление;
- составление математической модели в принятых обозначениях и терминах.

Собственно оптимизация включает два этапа:

- выбор методов и алгоритмов решения оптимизационной задачи, реализация их в аналитическом или численном виде;
- анализ полученных результатов, их интерпретация и принятие решения.

Процесс измельчения кормового зерна является весьма энергоемким (до 10-15 кВт·ч/т), поэтому критерии оптимальности должны отвечать, во-первых, режиму энергосбережения. Во-

вторых, измельченное зерно по механическим характеристикам должно соответствовать физиологии животных, что также должно отражаться в критериях оптимальности.

Перечень факторов процесса должен включать кинематические и геометрические параметры исследуемых рабочих органов, а также технологические свойства измельчаемого сырья.

Решение задачи оптимизации данного процесса осложняется множеством регламентирующих требований, часто противоречащих друг другу. Далее мы покажем это на конкретных примерах.

Предполагаем, что экспериментальные модели процесса измельчения строятся в виде уравнений регрессии, полученных на основе реализации планов второго порядка

$$y(x_i, b_i) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^n b_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

где y – критерий оптимальности;

x_1, x_2, \dots, x_n – переменные (факторы процесса) в количестве n ;

b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} – коэффициенты, вычисленные на основе обработки экспериментальных данных.

Для всестороннего исследования процесса измельчения кормового зерна необходимо получение в каждом опыте информации о следующих показателях:

- 1) требуемой общей мощности N_T при осуществлении процесса измельчения и мощности N_{XX} холостого хода;
- 2) производительности измельчителя Q , заданной или достигнутой;
- 3) степени измельчения зерна $\lambda = D/M$, где D – эквивалентный средний диаметр исходных зерновок, M – модуль размола;
- 4) модуле размола M , как средневзвешенном размере частиц полученной дерти;
- 5) средневзвешенном коэффициенте вариации модуля помола $v = \sigma/M$, (%), где σ – среднее квадратическое отклонение величины M ;

6) относительно (по массе) количестве целых зерен ζ (%), как остатке на решете с диаметром отверстий 5 мм.

Очевидно, что в экспериментах получают лишь оценки перечисленных реальных величин.

После обработки экспериментальной информации необходимо получение следующих уравнений регрессии:

1) для энергоёмкости собственно процесса измельчения с учетом достигнутой степени измельчения ($\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \lambda)$)

$$\varepsilon = \frac{N}{Q\lambda} = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где $N = N_T - N_{XX}$;

2) для модуля размола (мм)

$$M = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

3) для коэффициента вариации модуля размола (%)

$$v = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

4) для относительного (по массе) количества целых зерен (%)

$$\zeta = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Таким образом, задача оптимизации процесса измельчения является многокритериальной, в которой критериями оптимальности выступают величины ε , M , v и ζ . К сожалению, при таком количестве критериев задача оптимизации строго математически решена быть не может. В таких случаях обычно довольствуются методами принятия решений [1].

Однако анализ технологических и зоотехнических аспектов измельчения зерна позволяет свести данную многокритериальную задачу к однокритериальной, используя метод выделения главного критерия. При этом другие критерии переводятся в ограничения [1].

С учетом сказанного в общем виде задача оптимизации процесса измельчения кормового зерна может быть сформулирована в виде условной оптимизации:

$$\varepsilon(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min; \quad (2)$$

$$[M_1] \leq M(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq [M_2]; \quad (3)$$

$$0 \leq v(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq [v]; \quad (4)$$

$$\zeta(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0. \quad (5)$$

где $[M_1]$, $[M_2]$ – допустимые значения модуля размола, определяемые нормативными документами;

$[v]$ – допустимое значение коэффициента вариации модуля размола.

Результаты исследований

Одним из принципиальных вопросов в данной оптимизационной задаче (2)-(5) является обоснование допустимых значений $[M_1]$ и $[M_2]$.

В статье [7] показано, что без данных ограничений минимизация критерия $\varepsilon(x_1, x_2, \dots, x_n)$ имеет мало смысла, поскольку минимуму отвечают такие значения факторов $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$, при которых $\lambda \rightarrow 1$.

Модуль размола M определяется при помощи ситового анализа. Его, в соответствии с ныне действующим ГОСТ 13496.8-72, нужно проводить на наборах сит с круглыми отверстиями [5].

Однако на вальцовых плющилках и в вибрационных измельчителях продукт получается в виде хлопьев, при этом регламентируется средняя толщина хлопьев [6]. Потому для дерти, полученной при помощи данных рабочих органов, целесообразно проводить ситовой анализ на ситах с прямоугольными отверстиями, ширина которых соответствует диаметру сит с круглыми отверстиями.

Следующий вопрос, который возникает перед каждым исследователем процесса измельчения зерна, – сколько сит применить и каков должен быть диаметр отверстий (ширина прямоугольных отверстий).

ГОСТ 13496.8-72 проводит анализ, используя 2-3 сита в зависимости от требований стандарта на данный вид комбикорма. Для научных исследований набор из 2-3 сит дает мало информации. Здесь следует придерживаться положений СТО АИСТ 1.14.2 – 2020, который предусматривает использование сит с диаметрами: 0,25; 0,6; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 мм.

Измельчители кормового зерна для сельскохозяйственных предприятий должны быть универсальными в том смысле, что должны обеспечивать такой размер частиц дерти (модуль размола), который соответствует потребностям каждого вида сельскохозяйственных животных. Наиболее мелкое измельчение требуется для свиней. Обеспечить такое измельчение – трудная задача для измельчителя, да и затраты энергии в этом случае наибольшие. Поэтому наше предложение состоит в том, что оптимизацию параметров измельчителя нужно проводить именно для режима работы измельчителя при получении дерти мелкого размола. В этом случае, как показывает анализ разных источников

[2, 5, 6, 8], допустимыми значениями в ограничении (3) необходимо назначить

$$[M_1] = 0,2 \text{ мм}; [M_2] = 1,0 \text{ мм}. \quad (6)$$

Для плющилок и вибрационных измельчителей ограничения накладываются на толщину хлопьев [6]

$$[M_1] = 1,1 \text{ мм}; [M_2] = 1,8 \text{ мм}. \quad (7)$$

Мы, таким образом, постулируем, что, если измельчитель справился с подготовкой кормового зерна для свиней, то для других видов животных, где требуется более крупный размол, необходимый размер частиц дерти будет обязательно обеспечен.

Для молодняка свиней, выращиваемых в хозяйствах, остаток на сите с отверстиями диаметром 5 мм не допускается [8]. Фактически это означает, что в полученной дерти не должно быть целых зерен. Это требование нашло свое отражение в ограничении – равенстве (5).

Таким образом, при помощи ограничений (6) и (7) учтены основные требования ГОСТов и других нормативных документов.

Более сложной задачей является выбор ограничения на коэффициент ν вариации модуля помола. Дело в том, что регламентирующий документ [6] ставит очень жесткое условие $\nu \leq 10\%$. Однако молотковые дробилки имеют $\nu = 60 \dots 40\%$ и выше, вибрационные – $40 \dots 50\%$, с режущим рабочим органом – $30 \dots 40\%$ [9-12]. Ограничение $\nu \leq 10\%$ практически невыполнимо в современных измельчителях кормового зерна.

Нами предлагается установить в научных исследованиях следующее граничное условие

$$[\nu] = 50\%. \quad (8)$$

Преодоление данного условия является очень хорошим результатом для молотковой дробилки.

Близкий перечень критериев оптимальности применен в кандидатских диссертациях К.Ю. Микрюкова, Н.В. Турубанова и О.Ю. Медведева, выполненных в НИИСХ Северо-Востока (г. Киров) под руководством профессора А.В. Алешкина. Однако в перечисленных работах задача оптимизации решалась в начальном многокритериальном виде. При 4-5 критериях такую задачу можно выполнить лишь на интуитивном уровне, руководствуясь здравым смыслом. Естественно, в этом случае могут быть ошибки и просчеты.

Продемонстрируем отличие нашего подхода на примере экспериментальных данных кандидатской диссертации Н.В. Турубанова [10], в которой получены уравнения регрессии для критериев Δ , M , ν и Π . Факторы в этих уравнениях записаны в кодированном виде, в наших обозначениях: x_1 , x_2 , x_4 . Фактор x_3 отсутствует.

Итак, полученные Н.В. Турубановым уравнения регрессии в несколько переработанном нами виде составляют набор:

$$\Delta = 4,474 + 0,282 \cdot x_1 - 0,398 \cdot x_2 + 0,206 \cdot x_4 - 0,208 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,137 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,045 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,309 \cdot (x_4)^2; \quad (9)$$

$$M = 1,170 + 0,141 \cdot x_1 - 0,163 \cdot x_2 + 0,045 \cdot x_4 - 0,058 \cdot (x_1)^2 - 0,036 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,040 \cdot x_1 \cdot x_4 + 0,020 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,093 \cdot (x_4)^2; \quad (10)$$

$$\nu = 66,340 + 5,338 \cdot x_1 + 4,277 \cdot x_2 - 1,018 \cdot x_4 + 3,081 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1,222 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,055 \cdot (x_1)^2 + 2,343 \cdot x_2 \cdot x_4 - 2,238 \cdot (x_4)^2; \quad (11)$$

$$\Pi = 0,686 + 0,381 \cdot x_1 - 0,715 \cdot x_2 + 0,146 \cdot x_4 - 0,228 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,262 \cdot x_1 \cdot x_4 + 0,170 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,490 \cdot (x_4)^2. \quad (12)$$

Физический смысл переменных: x_1 , x_2 , x_4 разъяснен в автореферате [10].

При создании нами компьютерной программы оптимизации (рис.) оставлен один критерий оптимальности Δ . Остальные критерии в соответствии с моделью (2)-(5) переведены в ограничения.

Оптимизация проведена в среде *Mathcad 15* при помощи встроенной функции *Minimize* и метода сопряженных градиентов.

Компьютер нашел оптимальное решение: $x_1^* = -0,054$; $x_2^* = 2,994$;

$x_3^* = -2,488$. При этом соблюдены все ограничения, а энергоемкость собственно процесса измельчения составляет $5,065 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ (т·л) (рис.).

К сожалению, оптимальная точка лежит далеко за пределами области эксперимента (по переменным x_2 и x_3), поэтому результаты оптимизации должны быть проверены дополнительными экспериментами.

ФУНКЦИЯ ЦЕЛИ

$$\Theta(x_1, x_2, x_4) := 4.474 + 0.282 \cdot x_1 - 0.398 \cdot x_2 + 0.206 \cdot x_4 - 0.208 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.137 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0.045 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0.309 \cdot (x_4)^2$$

ТОЧКИ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ

$$x_1 := 0 \quad x_2 := 0 \quad x_4 := 0$$

Given ОГРАНИЧЕНИЯ

$$0.2 \leq 1.170 + 0.141 \cdot x_1 - 0.163 \cdot x_2 + 0.045 \cdot x_4 - 0.058 \cdot (x_1)^2 - 0.036 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.040 \cdot x_1 \cdot x_4 + 0.020 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0.093 \cdot (x_4)^2 \leq 1.0$$

$$0 \leq 66.340 - 5.338x_1 + 4.277 \cdot x_2 - 1.018 \cdot x_4 + 3.081 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1.222 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0.055 \cdot (x_1)^2 + 2.343 \cdot x_2 \cdot x_4 - 2.238 \cdot (x_4)^2 \leq 50$$

$$0.686 + 0.381 \cdot x_1 - 0.715 \cdot x_2 + 0.146x_4 - 0.228x_1 \cdot x_2 + 0.262 \cdot x_1 \cdot x_4 + 0.170 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0.490 \cdot (x_4)^2 = 0$$

ВСТРОЕННАЯ ФУНКЦИЯ МАТНСАД ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ

$$\text{opt}\Theta(x_1, x_2, x_4) := \text{Minimize}(\Theta, x_1, x_2, x_4)$$

РЕЗУЛЬТАТ ОПТИМИЗАЦИИ

$$\text{opt}\Theta(x_1, x_2, x_4) = \begin{pmatrix} -0.054 \\ 2.994 \\ -2.488 \end{pmatrix}$$

ПРОВЕРКА ОГРАНИЧЕНИЙ

$$x_1 := -0.054 \quad x_2 := 2.994 \quad x_4 := -2.488$$

$$1.170 + 0.141 \cdot x_1 - 0.163 \cdot x_2 + 0.045 \cdot x_4 - 0.058 \cdot (x_1)^2 - 0.036 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.040 \cdot x_1 \cdot x_4 + 0.020 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0.093 \cdot (x_4)^2 = 1$$

$$66.340 - 5.338x_1 + 4.277 \cdot x_2 - 1.018 \cdot x_4 + 3.081 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1.222 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0.055 \cdot (x_1)^2 + 2.343 \cdot x_2 \cdot x_4 - 2.238 \cdot (x_4)^2 = 49.997$$

$$0.686 + 0.381 \cdot x_1 - 0.715 \cdot x_2 + 0.146x_4 - 0.228x_1 \cdot x_2 + 0.262 \cdot x_1 \cdot x_4 + 0.170 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0.490 \cdot (x_4)^2 = 3.587 \times 10^{-4}$$

ЗНАЧЕНИЕ ФУНКЦИИ ЦЕЛИ В ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЧКЕ

$$\Theta(x_1, x_2, x_4) = 5.055$$

Рис. Компьютерная программа и решение задачи оптимизации процесса измельчения кормового ячменя

Автор исходного исследования [10] дает иной результат: $x_1 = 0$; $x_2 = 1$; $x_4 = 0$, при этом $\Theta = 4,16$ кВт·ч/(т·λ); $M = 1,07$ мм, $\nu = 69\%$, $M = 0,3\%$. В данном случае требуемые показате-

тели дерти (для молодняка свиней) не выполняются.

Полученный при оптимизации результат еще должен быть сравнен с достигнутым уровнем техники и технологии, т.е. с показателями се-

рийно выпускаемых машин. Очевидно, что конструкторы, выбирая мощность приводного электродвигателя, ориентируются на наилучший случай. В свете обсуждающих проблем таким случаем является мелкое измельчение зерна для молодняка свиней и учет холостого хода дробилки.

Запишем еще раз формулу для \mathcal{E} :

$$\mathcal{E} = \frac{N}{Q\lambda}, \quad (13)$$

где $N = N_T - N_{xx}$.

После преобразований получим выражение для расчета мощности приводного электродвигателя (без учета КПД привода)

$$N_T = \mathcal{E}Q\lambda + N_{xx}, \quad (14)$$

где $\lambda = D/M$ (D – эквивалентный диаметр исходных зерновок).

Прибавку на мощность холостого хода можно учесть и по-другому, через коэффициент учета мощности холостого хода χ .

$$N_T = \chi \mathcal{E}Q\lambda. \quad (15)$$

По некоторым оценкам, коэффициент χ для молотковых дробилок варьирует от 1,15-1,20 [2] до 2,0 [9].

При сравнительных расчетах в научных исследованиях лучше все-таки пользоваться формулой (14), а значение показателя N_{xx} подставлять то, что было получено в эксперименте на режиме работы измельчителя с оптимальными параметрами.

Выводы

1. Самый напряженный режим измельчителя фуражного зерна связан с приготовлением дерти для молодняка свиней, поскольку регламентирующие документы требуют для этого случая мелкий размол зерна, отсутствие в дерти целых зерен и мучнистой фракции, определенную выравненность дерти по размерам составляющих частиц.

2. Оптимизацию процесса измельчения предлагается проводить именно при реализации режима приготовления дерти для молодняка свиней, независимо от типа рабочих органов. Это позволит получать сопоставимые данные и сравнивать измельчители между собой.

3. Установлено, что корректную, с математической точки зрения, оптимизацию нужно проводить, используя метод главного критерия для энергоёмкости собственно процесса измельче-

ния, а другие критерии оптимальности необходимо переводить в ограничения.

4. Методологические предложения по оптимизации процесса измельчения кормового зерна реализованы в компьютерной программе на базе среды *Mathcad 15*, при этом проведен анализ конкретных экспериментальных данных.

Библиографический список

1. Федоренко, И. Я. Оптимизация и принятие решений в агроинженерных задачах: учебное пособие / И. Я. Федоренко, С. В. Морозова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. – 288 с. – Текст: непосредственный.
2. Мельников, С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм / С. В. Мельников. – Ленинград: Колос, 1978. – 560 с. – Текст: непосредственный.
3. ИТС 48-2017 Повышение энергетической эффективности при осуществлении хозяйственной и (или) иной деятельности. – Москва: Бюро НДТ, 2017. – 171 с. – Текст: непосредственный.
4. ГОСТ 31607-2012. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 27 с. – Текст: непосредственный.
5. ГОСТ 13496.8-72. Комбикорма. Методы определения крупности размола и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений. – Москва: Стандартинформ, 2011. – 3 с. – Текст: непосредственный.
6. СТО АИСТ 1.14.2-2020. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для кормопроизводства. Показатели назначения и надежности. Общие требования. – Москва: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. – 31 с. – Текст: непосредственный.
7. Федоренко, И. Я. Феноменологический подход к описанию измельчения фуражного зерна / И. Я. Федоренко. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 4. – С. 93-100.
8. ГОСТ 34109-2017. Комбикорма полнорационные для свиней. Общие технические требования. – Москва: Стандартинформ, 2017. – Текст: непосредственный.
9. Воронин, В. В. Совершенствование рабочего процесса безрешетной молотковой дробилки: автореферат диссертации на соискание уче-

ной степени кандидата технических наук / Воронин Владимир Викторович. – Воронеж, 2006. – 21 с. – Текст: непосредственный.

10. Турубанов, Н. В. Повышение эффективности процесса дробления зерна в молотковой дробилке путем разделения дерти воздушным потоком: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Турубанов Николай Валентинович. – Киров, 2004. – 24 с. – Текст: непосредственный.

11. Левин, А. М. Обоснование конструктивно-режимных параметров вибрационно-ударного измельчителя фуражного зерна: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.01 / Левин Алексей Михайлович. – Новосибирск, 2005. – 19 с. – Текст: непосредственный.

12. Сергеев, Н. С. Центробежно-роторные измельчители фуражного зерна: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.20.01 / Сергеев Николай Степанович. – Челябинск, 2008. – 38 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Fedorenko, I. Ya. Optimizatsiya i prinyatie resheniy v agroinzhenernykh zadachakh: uchebnoe posobie / I. Ya. Fedorenko, S. V. Morozova. – 2-e izd., pererab. i dop. – Sankt-Peterburg: Lan, 2016. – 288 s. – Текст: непосредственный.

2. Melnikov, S. V. Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya zhivotnovodcheskikh ferm / S. V. Melnikov. – Leningrad: Kolos, 1978. – 560 s. – Текст: непосредственный.

3. ITS 48-2017 Povyshenie energeticheskoy effektivnosti pri osushchestvlenii khozyaystvennoy i (ili) inoy deyatel'nosti. – Moskva: Byuro NDT, 2017. – 171 s. – Текст: непосредственный.

4. GOST 31607-2012. Energoberezhenie. Normativno-metodicheskoe obespechenie. Osnovnye polozheniya. – Moskva: Standartinform, 2012. – 27 s. – Текст: непосредственный.

5. GOST 13496.8-72. Kombikorma. Metody opredeleniya krupnosti razmola i sodержaniya

nerazmolotykh semyan kulturnykh i dikorastushchikh rasteniy. – Moskva: Standartinform, 2011. – 3 s. – Текст: непосредственный.

6. STO AIST 1.14.2-2020. Ispytaniya selskokhozyaystvennoy tekhniki. Mashiny dlya kormoproizvodstva. Pokazateli naznacheniya i nadezhnosti. Obshchie trebovaniya. – Moskva: FGBNU «Rosinformagrotekh», 2020. – 31 s. – Текст: непосредственный.

7. Fedorenko, I. Ya. Fenomenologicheskii podkhod k opisaniyu izmelcheniya furazhnogo zerna / I. Ya. Fedorenko. – Текст: непосредственный // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2021. – No. 4. – S. 96-101.

8. GOST 34109-2017. Kombikorma polnoratsionnye dlya sviney. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. – Moskva: Standartinform, 2017. – Текст: непосредственный.

9. Voronin, V. V. Sovershenstvovanie rabochego protsessa bezreshetnoy molotkovoy drobilki: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Voronin Vladimir Viktorovich. – Voronezh, 2006. – 21 s. – Текст: непосредственный.

10. Turubanov, N. V. Povyshenie effektivnosti protsessa drobleniya zerna v molotkovoy drobilke putem razdeleniya derti vozdushnym potokom: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Turubanov Nikolay Valentinovich. – Киров, 2004. – 24 s. – Текст: непосредственный.

11. Levin, A. M. Obosnovanie konstruktivno-rezhimnykh parametrov vibratsionno-udarnogo izmelchatelya furazhnogo zerna: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.20.01 / Levin Aleksey Mikhaylovich. – Novosibirsk, 2005. – 19 s. – Текст: непосредственный.

12. Sergeev, N. S. Tsentrobezhno-rotornye izmelchiteli furazhnogo zerna: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk: 05.20.01 / Sergeev Nikolay Stepanovich. – Chelyabinsk, 2008. – 38 s. – Текст: непосредственный.

