

УДК 636.08.003 ББК 32.973.202

Дударев Виталий Николаевич

аспирант кафедры «Технические системы в АПК»,

Кокошин Сергей Николаевич

канд.техн.наук, доцент кафедры «ТСвАПК»

ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного

Зауралья»,

г. Тюмень

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОРМОРАЗДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Аннотация. Представлена комплексная математическая модель процесса кормораздачи, включающая физическую модель выгрузки кормовой смеси, статистическую модель распределения и алгоритмы компьютерного зрения для контроля качества. Разработана методика многокритериальной оптимизации параметров кормораздачи с использованием метода роевого интеллекта. Экспериментально подтверждена эффективность предложенных решений: снижение коэффициента вариации с 29,2% до 18,7%, экономия энергозатрат на 19%, общий экономический эффект составил 730 тыс. руб./год для фермы 500 голов.

Ключевые слова: кормораздача, математическое моделирование, компьютерное зрение, оптимизация, коэффициент вариации

A comprehensive mathematical model of the feed distribution process is presented, including a physical model of feed mixture discharge, a statistical distribution model, and computer vision algorithms for quality control. A multi-criteria optimization methodology for feed distribution parameters has been developed using the swarm intelligence method. The effectiveness of the proposed solutions has been experimentally confirmed: reduction of the coefficient of variation from 29.2% to 18.7%, energy consumption savings of 19%, with a total economic effect of 730 thousand rubles per year for a farm with 500 head of cattle.

Keywords: feed distribution, mathematical modeling, computer vision, optimization, coefficient of variation

Введение

Равномерность распределения кормовой смеси является критическим фактором эффективности молочного скотоводства. Неравномерная кормораздача приводит к селективному потреблению кормов, снижению продуктивности и перерасходу кормов до 12-15% [1, 2]. По данным исследований, коэффициент вариации высоты кормового валика на молочных фермах России составляет 25-35%, что значительно превышает рекомендуемые нормы (не более 15%) [3, 4].

Существующие системы контроля основаны на субъективной визуальной оценке оператора, что не обеспечивает требуемую точность и стабильность процесса. Традиционные методы контроля не учитывают изменяющиеся условия эксплуатации: влажность кормов, температурные условия, износ оборудования, что приводит к дополнительным потерям эффективности [5, 6].

Современные тенденции развития сельского хозяйства направлены на цифровизацию и автоматизацию технологических процессов. Применение компьютерного зрения для контроля качества кормораздачи позволяет обеспечить объективную оценку равномерности распределения кормов в режиме реального времени [7, 8].

Цель исследования – разработка математической модели процесса кормораздачи и системы автоматического контроля на основе компьютерного зрения для повышения равномерности распределения кормов.

Задачи исследования:

1. Разработать математическую модель процесса кормораздачи с учетом технологических и конструктивных факторов;

2. Создать алгоритмы компьютерного зрения для автоматического контроля качества распределения кормов;
3. Сформулировать и решить задачу многокритериальной оптимизации параметров кормораздачи;
4. Провести экспериментальную проверку эффективности разработанных решений.

1. Методы и материалы

Исследования проводились на молочно-товарной ферме с поголовьем 500 голов крупного рогатого скота. Использовались кормосмеситель-раздатчик горизонтального типа объемом 12 м³ с гидравлическим приводом выгрузных органов.

Система видеонаблюдения включала 4 промышленные камеры разрешением 1920×1080 пикселей, установленные над кормовым столом на высоте 3,5 м. Камеры обеспечивали полное покрытие зоны кормления длиной 180 м.

Для оценки равномерности распределения применялся коэффициент вариации:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (2.1)$$

где σ – среднееквадратичное отклонение количества корма, μ – среднее значение количества корма на единицу длины кормового стола.

Измерения проводились в 30 точках по длине кормового стола через каждые 6 м. Высота кормового валика определялась с помощью разработанных алгоритмов компьютерного зрения и дублировалась ручными измерениями для верификации результатов.

Исследования физико-механических свойств кормовой смеси включали определение:

- плотности ($\rho = 650-850$ кг/м³);
- влажности ($W = 45-55\%$);
- угла внутреннего трения ($\varphi = 25-40^\circ$);

- коэффициента сцепления ($c = 200-400$ Па).

2. Результаты и обсуждение

2.1. Математическая модель процесса кормораздачи

Разработана комплексная математическая модель, включающая детерминированную и стохастическую компоненты процесса кормораздачи.

Основное уравнение распределения корма:

$$\frac{dQ}{dl} = \rho \times A \times \frac{v_B}{v_D} \quad (2.2)$$

где $\frac{dQ}{dl}$ – количество выгружаемого корма на единицу длины кормового стола, ρ – плотность кормовой смеси (кг/м^3), A – площадь поперечного сечения потока корма (м^2), v_B – скорость выгрузки корма (м/с), v_D – скорость движения кормораздатчика (м/с).

Траектория движения частиц корма описывается системой уравнений [3, 4]:

$$x(t) = v_0 \times \cos \alpha \times t \quad (2.3)$$

$$y(t) = h_0 + v_0 \times \sin \alpha \times t - \frac{g \times t^2}{2} \quad (2.4)$$

где v_0 – начальная скорость частицы, α – угол выброса частицы к горизонту, h_0 – высота выгрузки, g – ускорение свободного падения.

Дальность полета частицы:

$$L = \frac{v_0^2}{g} \times \sin(2\alpha) + \frac{v_0 \times \cos(\alpha)}{g} \times \sqrt{v_0^2 \times \sin^2(\alpha) + 2 \times g \times h_0} \quad (2.5)$$

Зависимость коэффициента вариации от технологических параметров:

$$CV(v_D, \omega_{ш}, h_B) = CV_0 \times \left[1 + \alpha \times \left(\frac{v_D}{v_{опт}} - 1 \right)^2 + \beta \times \left(\frac{\omega_{ш}}{\omega_{опт}} - 1 \right)^2 + \gamma \times \left(\frac{h_B}{h_{опт}} - 1 \right)^2 \right] \quad (2.6)$$

Экспериментально определены коэффициенты: $\alpha = 1,24$ (влияние скорости движения), $\beta = 0,87$ (влияние скорости вращения шнека), $\gamma = 0,65$ (влияние высоты выгрузки).

Динамическая модель процесса учитывает переходные процессы [5, 8]:

$$\tau_1 \times \frac{d^2Q}{dt^2} + \tau_2 \times \frac{dQ}{dt} + Q = K \times U(t - \tau_3) \quad (2.7)$$

где $\tau_1 = 2,1-2,8$ с (инерционность механической системы), $\tau_2 = 0,8-1,2$ с (демпфирование колебаний), $\tau_3 = 0,3-0,5$ с (транспортное запаздывание), $K = 0,85-1,15$ (коэффициент передачи).

Стохастическая компонента модели:

$$Q(t, x) = Q_{\text{дет}}(t, x) + \xi(t, x) \quad (2.8)$$

где $Q_{\text{дет}}(t, x)$ – детерминированная составляющая, $\xi(t, x)$ – случайная составляющая с корреляционной функцией:

$$R_{\xi}(\tau) = \sigma^2 \times \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{\text{корр}}}\right) \quad (2.9)$$

где $\tau_{\text{корр}} = 1,2-1,8$ с – время корреляции возмущений.

2.2. Влияние факторов на равномерность распределения

Влияние загрузки бункера:

$$Q(M) = Q_{\text{номин}} \times \left[1 + \alpha_M \times \left(\frac{M}{M_{\text{полн}}} - 0,5\right)^2\right] \quad (2.10)$$

где M – текущая масса корма в бункере, $M_{\text{полн}}$ – масса при полной загрузке, $\alpha_M = -0,23$ – коэффициент влияния загрузки [6, 9].

Модель износа оборудования:

$$\eta_{\text{износ}}(t) = \eta_0 \times (1 - k_{\text{изн}} \times t - k_{\text{прогр}} \times t^2) \quad (2.11)$$

где η_0 – начальная эффективность, $k_{\text{изн}} = 0,0012$ год⁻¹ – коэффициент линейного износа, $k_{\text{прогр}} = 0,00008$ год⁻² – коэффициент прогрессирующего износа.

Влияние свойств кормовой смеси [2, 9]:

$$K_{\text{корм}} = 1,12 - 0,0003 \times \rho_{\text{корм}} + 0,008 \times W_{\text{корм}} - 0,15 \times d_{\text{части}} + 0,0025 \times \varphi \quad (2.12)$$

где $\rho_{\text{корм}}$ – плотность кормовой смеси, $W_{\text{корм}}$ – влажность корма, $d_{\text{части}}$ – средний размер частиц, φ – угол внутреннего трения.

2.3. Система компьютерного зрения

Разработана архитектура системы компьютерного зрения, включающая блоки формирования изображения, предварительной обработки, сегментации, извлечения признаков и принятия решений [7, 8].

Модель формирования изображения учитывает проективное преобразование:

$$u = \frac{f \times X}{Z - Z_0} + u_0 \quad (2.13)$$

$$v = \frac{f \times Y}{Z - Z_0} + v_0 \quad (2.14)$$

где (u, v) – пиксельные координаты, (X, Y, Z) – пространственные координаты, f – фокусное расстояние, (u_0, v_0) – координаты главной точки.

Коррекция дисторсии объектива:

$$u_{\text{корр}} = u + u \times (k_1 \times r^2 + k_2 \times r^4) + 2 \times p_1 \times u \times v + p_2 \times (r^2 + 2 \times u^2) \quad (2.15)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты радиальной дисторсии, p_1, p_2 – коэффициенты тангенциальной дисторсии.

Адаптивная пороговая сегментация:

$$T_{\text{адапт}}(x, y) = \mu_{\text{лок}}(x, y) + k \times \sigma_{\text{лок}}(x, y) \quad (2.16)$$

где $k = 0,83$ – адаптивный коэффициент, $\mu_{\text{лок}}$ – локальное среднее значение яркости, $\sigma_{\text{лок}}$ – локальное стандартное отклонение.

Двухуровневая адаптация порога:

$$\text{- При } \sigma_{\text{лок}} > \sigma_{\text{порог}}: T(x, y) = \mu_{\text{лок}} + k^1 \times \sigma_{\text{лок}}, \text{ где } k^1 = 0,83 \quad (2.17)$$

$$\text{- При } \sigma_{\text{лок}} \leq \sigma_{\text{порог}}: T(x, y) = \mu_{\text{глоб}} + k^2 \times \sigma_{\text{глоб}}, \text{ где } k^2 = 1,15 \quad (2.18)$$

Коррекция перспективных искажений:

$$h_{\text{real}}(x) = h(x) \times \cos(\theta) \times \frac{Z_{\text{ref}}}{Z(x)} \quad (2.19)$$

где θ – угол наклона камеры, Z_{ref} – эталонное расстояние, $Z(x)$ – расстояние до точки измерения.

Показатели производительности системы:

- Время обработки одного кадра: 85-120 мс
- Точность сегментации: 96,7%

- Погрешность измерения высоты: $\pm 3,5$ мм (доверительная вероятность 95%)

- Частота обновления данных: 10-15 FPS

2.4. Многокритериальная оптимизация

Сформулирована задача многокритериальной оптимизации [10]:

$$F(x) = w_1 \times f_1(x) + w_2 \times f_2(x) + w_3 \times f_3(x) + w_4 \times f_4(x) \quad (2.20)$$

где $x = [v_d, \omega_{ш}, h_v, N_{прох}]^T$ – вектор оптимизируемых параметров.

Частные критерии:

$$1. \text{ Критерий качества: } f_1(x) = \frac{CV(x)}{CV_{норм}} \quad (2.21)$$

$$2. \text{ Критерий энергоэффективности: } f_2(x) = \frac{E_{спец}(x)}{E_{норм}} \quad (2.22)$$

$$3. \text{ Критерий производительности: } f_3(x) = \frac{T_{цикл}(x)}{T_{норм}} \quad (2.23)$$

$$4. \text{ Критерий износа: } f_4(x) = \frac{I_{износ}(x)}{I_{норм}} \quad (2.24)$$

Модель энергозатрат:

$$E_{спец} = E_{базовая} \times \left[1 + \beta_1 \times \left(\frac{v_d}{v_{нормин}} \right)^3 + \beta_2 \times \left(\frac{\omega_{ш}}{\omega_{нормин}} \right)^2 + \beta_3 \times N_{прох} \right] \quad (2.25)$$

$$\text{где } E_{базовая} = 0,85 \text{ кВт} \times \text{ч/т}, \beta^1 = 0,45, \beta^2 = 0,28, \beta^3 = 0,35. \quad (2.26)$$

Модель времени цикла:

$$T_{цикл} = \frac{L_{маршр}}{v_d \times k_{эфф}} \times N_{прох} + T_{подгот} + T_{маневр} \times N_{прох} \quad (2.27)$$

Где $L_{маршр} = 180$ м, $k_{эфф} = 0,85$, $T_{подгот} = 5$ мин, $T_{маневр} = 2$ мин.

Весовые коэффициенты определены методом анализа иерархий [10]:

- $w_1 = 0,54$ (качество распределения)

- $w_2 = 0,28$ (энергоэффективность)

- $w_3 = 0,12$ (производительность)

- $w_4 = 0,06$ (износ оборудования)

Ограничения задачи:

- Технологические: $2,0 \leq v_d \leq 6,0 \text{ км/ч}$; $80 \leq \omega_{\text{ш}} \leq 200 \text{ об/мин}$; $100 \leq h_b \leq 300 \text{ мм}$

- Качественные: $CV(x) \leq 20\%$; $h_{\text{мин}} \geq 50 \text{ мм}$; $h_{\text{макс}} \leq 400 \text{ мм}$

- Экономические: $C_{\text{корм}} \leq 1,15 \times C_{\text{план}}$; $C_{\text{топл}} \leq 1,10 \times C_{\text{план}}$

Для решения использован алгоритм роевого интеллекта (PSO) с параметрами:

- Размер популяции: 30 частиц

- Инерционный коэффициент: $w = 0,7$

- Коэффициенты ускорения: $c_1 = c_2 = 2,0$

- Количество итераций: 100

Обновление скорости и позиции частиц:

$$v_{i,j}^{t+1} = w \times v_{i,j}^t + c_1 \times r_1 \times (pbest_{i,j} - x_{i,j}^t) + c_2 \times r_2 \times (gbest_j - x_{i,j}^t) \quad (2.28)$$

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + v_{i,j}^{t+1} \quad (2.29)$$

2.5. Адаптивная система управления

Разработана система адаптивного управления с обратной связью [8]:

ПИД-регулятор скорости движения:

$$\Delta v_d = K_p \times e(t) + K_i \times \int e(\tau) d\tau + K_d \times \frac{de}{dt} \quad (2.30)$$

$$\text{где } e(t) = CV_{\text{зад}} - CV_{\text{факт}}(t), K_p = 0,25, K_i = 0,08, K_d = 0,12. \quad (2.31)$$

Нейронная сеть прогнозирования:

- Архитектура: 12-20-15-4 (многослойный персептрон)

- Входные данные: погодные условия, свойства корма, состояние оборудования

- Выходные данные: оптимальные параметры $v_d, \omega_{\text{ш}}, h_b, N_{\text{прох}}$

- Точность прогнозирования: $R = 0,94$

3.6. Экспериментальные результаты

Верификация математической модели:

- Коэффициент детерминации: $R^2 = 0,947$

- Средняя квадратичная ошибка: $RMSE = 1,89\%$

- Средняя абсолютная ошибка: $MAE = 1,45\%$

- Критерий Фишера: $F = 167,3 > F_{\text{критич}} = 2,68$

Таблица 2.1: Оптимальные параметры для различных условий:

Условия	v_d , км/ч	$\omega_{ш}$, об/мин	h_b , мм	$N_{\text{прох}}$	CV , %
Стандартные	4,1	142	175	1	18,2
Влажная погода	3,8	138	190	1	19,8
Зимние условия	3,6	145	165	1	19,1
Высокая влажность корма	4,3	148	185	1	17,6

Таблица 2.2: Сравнение режимов работы:

Параметр	Базовый режим	Оптимизированный режим	Улучшение
CV , %	29,2	18,7	36%
Энергозатраты, кВт×ч/т	1,15	0,93	19%
Время цикла, мин	35	29	17%
Расход топлива, л/т	0,28	0,24	14%

2.7. Экономическая эффективность

Расчет экономического эффекта для фермы 500 голов:

Годовое потребление кормов: $500 \text{ голов} \times 18 \text{ кг/день} \times 365 \text{ дней} = 3285$
т/год

Снижение расхода кормов:

- Экономия от улучшения равномерности: $3285 \text{ т} \times 5,7\% = 187 \text{ т/год}$

- Стоимость экономии: $187 \text{ т} \times 7200 \text{ руб./т} = 1,35 \text{ млн руб./год}$

- С учетом поголовья 500 голов: $1,35 \times 0,5 = 675 \text{ тыс. руб./год}$

Экономия энергозатрат:

- Снижение потребления: $0,22 \text{ кВт} \times \text{ч/т} \times 3285 \text{ т/год} = 723 \text{ кВт} \times \text{ч/год}$
- Стоимость экономии: $723 \times 4,5 \text{ руб./кВт} \times \text{ч} = 3,25 \text{ тыс. руб./год}$

Экономия времени:

- Сокращение времени цикла: $6 \text{ мин/цикл} \times 730 \text{ циклов/год} = 73 \text{ час/год}$
- Стоимость экономии: $73 \times 450 \text{ руб./час} = 33 \text{ тыс. руб./год}$
- С учетом поголовья: $33 \times 0,5 = 16,5 \text{ тыс. руб./год}$

Общий экономический эффект: $675 + 3,25 + 16,5 = 694,75 \text{ тыс. руб./год}$

Дополнительные эффекты:

- Улучшение воспроизводства стада: $+15 \text{ тыс. руб./год}$
- Снижение ветеринарных расходов: $+8 \text{ тыс. руб./год}$
- Повышение качества молока: $+12 \text{ тыс. руб./год}$

Итоговый экономический эффект: $730 \text{ тыс. руб./год}$

2.8. Практическая реализация

Система интегрирована в программное обеспечение и обеспечивает:

- Автоматический расчет оптимальных параметров каждые 5 минут
- Плавную коррекцию параметров без остановки процесса
- Возможность переключения между автоматическим и ручным

режимами

- Регистрацию всех изменений в базе данных
- Формирование отчетов о качестве кормораздачи

Технические характеристики системы:

- Время отклика системы управления: $< 2 \text{ с}$
- Стабильность поддержания CV: $\pm 1,5\%$
- Надежность работы: $99,2\%$
- Энергопотребление системы контроля: $0,8 \text{ кВт}$

Заключение

1. Разработана комплексная математическая модель процесса кормораздачи, включающая детерминированную и стохастическую компоненты, с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,947$. Модель учитывает влияние технологических параметров, свойств кормовой смеси, износа оборудования и внешних факторов.

2. Создана система компьютерного зрения для автоматического контроля качества распределения кормов с точностью сегментации 96,7% и погрешностью измерения высоты валика $\pm 3,5$ мм. Система обеспечивает работу в реальном времени с частотой обновления 10-15 FPS.

3. Разработана методика многокритериальной оптимизации на основе алгоритма роевого интеллекта, позволяющая автоматически определять оптимальные параметры работы кормораздатчика с учетом качества распределения, энергоэффективности, производительности и износа оборудования.

4. Экспериментально подтверждено снижение коэффициента вариации с 29,2% до 18,7% (улучшение на 36%), сокращение энергозатрат на 19% и времени цикла на 17%.

5. Экономический эффект от внедрения системы составляет 730 тыс. руб./год для фермы 500 голов, что подтверждает высокую практическую значимость разработанных решений.

6. Система адаптивного управления с нейросетевым прогнозированием обеспечивает автоматическую настройку параметров при изменении условий эксплуатации с точностью прогнозирования $R = 0,94$.

Полученные результаты вносят значительный вклад в развитие теории и практики автоматизации процессов кормления в молочном скотоводстве и могут быть использованы при модернизации существующих и проектировании новых кормораздающих систем.

Список литературы

1. Технологические основы механизации и автоматизации животноводства / И.И. Хлыстунов, В.И. Земсков, В.И. Мурусидзе. – М.: Колос, 2014. – 456 с.
2. Дударев В.Н., Кокошин С.Н. Повышение эффективности функционирования производственных процессов в молочном животноводстве путём внедрения цифровых решений / В.Н. Дударев, С.Н. Кокошин // Агропромышленный комплекс в ногу со временем : сб. трудов Международной научно-практ. конф. – Тюмень, 2023. – С. 26–32.
3. Дударев В.Н., Кокошин С.Н. Анализ влияния цифровизации на производственные показатели и благосостояние КРС / С.Н. Кокошин, В.Н. Дударев // Инженерно-технологические решения проблем развития АПК и общества : сб. трудов LVIII междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Тюмень, 2024. – С. 21–26.
4. Дударев В.Н., Кокошин С.Н. Эффективность цифровизации в улучшении кормления и ухода за крупным рогатым скотом / С.Н. Кокошин, В.Н. Дударев // Сельский механизатор. – 2024. – № 3. – С. 2–3.
5. Системы точного кормления в молочном скотоводстве / под ред. А.П. Палий. – М.: Агропромиздат, 2016. – 324 с.
6. Цифровые технологии в сельском хозяйстве / В.А. Хорошев, А.С. Дорожкин, Н.И. Морозов. – М.: Росинформагротех, 2019. – 268 с.
7. Компьютерное зрение в животноводстве / Е.П. Тихончук, С.А. Рассказов, В.Н. Виноградов. – СПб.: Лань, 2020. – 184 с.
8. Автоматизация технологических процессов в животноводстве / Н.И. Морозов, И.И. Хлыстунов, В.И. Земсков. – М.: Агропромиздат, 2017. – 416 с.
9. Оптимизация кормления крупного рогатого скота / П.И. Викторов, В.К. Менькин. – М.: Росагропромиздат, 2018. – 295 с.
10. Методы математического моделирования в сельском хозяйстве / А.В. Петросян, И.Г. Романенко, В.А. Трушкин. – М.: Колос, 2015. – 352 с.