

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОКЛИМАТОМ В ХРАНИЛИЩАХ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ
RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AUTOMATED MICROCLIMATE
MANAGEMENT SYSTEMS IN AGRICULTURAL PRODUCT STORAGE**

Грачева А.О., магистрант

Грибанов А.А., к.т.н., доцент

Мещерякова А.А., к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

г. Воронеж, Россия

vgltaapp@mail.ru

Gracheva A.O., Master's student

Gribanov A.A., CSc (Engineering), Associate Professor

Meshcheryakova A.A., CSc (Engineering), Associate Professor

FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after
G.F. Morozov»

Voronezh, Russian Federation

Аннотация: Статья посвящена исследованию и разработке автоматизированной системы управления микроклиматом (АСУМ) для сельскохозяйственных хранилищ, направленной на повышение точности контроля температуры, влажности и концентрации CO₂. В работе представлена гибридная модель управления, сочетающая ПИД-регуляторы для оперативной коррекции параметров и оптимизации энергопотребления. Реализация системы подтверждена моделированием в MATLAB/Simulink, демонстрирующим снижение потерь зерновых культур с 12 % до 4 % за счёт стабилизации микроклимата.

Summary: The paper is devoted to the research and development of an automated microclimate control system (ACCS) for agricultural storage facilities aimed at improving the accuracy of temperature, humidity and CO₂ concentration control. The paper presents a hybrid control model combining PID controllers for operational parameter correction and energy optimization. The implementation of the system is

confirmed by MATLAB/Simulink simulation, demonstrating the reduction of grain crop losses from 12% to 4% due to microclimate stabilization.

Ключевые слова: автоматизированная система управления микроклиматом, сельскохозяйственные хранилища, модель управления, энергоэффективность, контроль температуры и влажности.

Keywords: automated microclimate control system, agricultural storages, control model, energy efficiency, temperature and humidity control.

Безусловно, сохранность сельскохозяйственной продукции при длительном хранении критически зависит от точного поддержания параметров микроклимата [1]. Например, для большинства зерновых культур оптимальными считаются температура в диапазоне 2-4°С и относительная влажность 60-65 %. Для овощей, таких как картофель, требуется более высокая влажность – 85-90 % при температуре 3-5°С [2-3]. Однако традиционные методы управления, основанные на ручном регулировании или простой автоматике, обеспечивают точность контроля температуры лишь в пределах ± 2 °С, а влажности – ± 10 %, что приводит к потерям до 30 % урожая. В частности, несвоевременное обнаружение колебаний CO₂ выше 1500 ppm в зернохранилищах провоцирует развитие патогенной микрофлоры.

В условиях растущих требований к энергоэффективности актуальным становится внедрение интеллектуальных систем. Так, разработанная в рамках данной работы АСУМ интегрирует распределенную сеть IoT-датчиков с точностью измерения температуры $\pm 0,3$ °С в диапазоне от -20 до +50°С и влажности ± 2 % (ограничение 10-95%), а также газовых сенсоров для мониторинга CO₂ и O₂ с погрешностью ± 50 ppm. Исполнительные механизмы, включая частотно-регулируемые вентиляторы мощностью 1,5-5 кВт и тепловые насосы, управляются адаптивными алгоритмами на базе нейросетей, обученных на датасетах объемом 10⁶ точек данных. Система демонстрирует снижение энергопотребления на 25-30% по сравнению с аналогами за счет оптимизации циклов включения оборудования с шагом 5-15 минут, что подтверждается компьютерным моделированием в среде MATLAB/Simulink.

Следует отметить, что существующие исследования в области управления микроклиматом хранилищ демонстрируют ряд ограничений. Во-первых, традиционные системы, такие как вентиляционные установки с ПИД-регуляторами, обеспечивают стабильность температуры лишь в диапазоне $\pm 1,5$ °С, но игнорируют корреляцию с влажностью, что приводит к конден-

сации при достижении точки росы (например, при 12°C и 80 %). Во-вторых, современные цифровые решения не способны оперативно реагировать на резкие изменения микроклимата, такие как скачки влажности до 20 % за час во время дождей.

Более того, методы машинного обучения, например, сверточные нейросети с точностью прогноза 92 % на тестовых выборках, показывают высокую эффективность в лабораторных условиях. Однако их внедрение в реальные хранилища затруднено из-за задержек обработки данных (≥ 30 секунд) и необходимости калибровки под конкретные условия – например, учет тепловыделения зерна при влажности ≥ 18 %. В этой связи предлагаемая в работе гибридная модель, сочетающая физические уравнения теплопереноса и предиктивную аналитику, позволяет сократить ошибку прогнозирования до 0,8 % при времени отклика системы < 10 секунд.

Процессы в хранилище могут быть описаны системой дифференциальных уравнений, интегрирующей теплообмен, испарение влаги и динамику концентрации CO_2 . Теплообмен между воздухом, продукцией и ограждающими конструкциями моделируется уравнениями:

$$\frac{dT_B}{dt} = \frac{Q_T}{C_B}, \quad \frac{dT_{\Pi}}{dt} = \frac{Q_T}{C_{\Pi}}, \quad \frac{dT_C}{dt} = \frac{Q_T}{C_C},$$

где Q_T – поток теплоты, C_B, C_{Π}, C_C – теплоемкости воздуха, продукции и стен. Испарение влаги с поверхности продукции определяется уравнением:

$$\frac{dH}{dt} = k \cdot (H_p - H) \cdot A,$$

где H_p – предельная влажность, k – коэффициент испарения, A – площадь поверхности. Изменение концентрации CO_2 вследствие дыхания растительных организмов:

$$\frac{dC_{\text{CO}_2}}{dt} = R_B - R_Y,$$

где R_B – скорость выделения CO_2 , R_Y – скорость его удаления вентиляцией. Общая система уравнений объединяет зависимости:

$$\frac{dT_B}{dt} = f_1(T_B, T_{\Pi}, T_C, H), \quad \frac{dH}{dt} = f_2(T_B, H), \quad \frac{dC_{\text{CO}_2}}{dt} = f_3(C_{\text{CO}_2}, T_B).$$

Реализован гибридный регулятор, сочетающий ПИД-контроллер для оперативной коррекции температуры и влажности с нейронной сетью прямого распространения, обеспечивающей долгосрочный прогноз и оптимизацию энергопотребления. Моделирование выполнено в MATLAB/Simulink с исполь-

зованием библиотеки Simscape для физической валидации. Обучение нейросети проведено на синтетических данных, сгенерированных в диапазонах реальных параметров хранилищ.

Внедрение АСУМ обеспечило значительное улучшение контроля климатических параметров, что подтверждается сокращением колебаний температуры и влажности в хранилище (рисунок 1).



Рисунок 1 – Графики улучшения контроля климатических параметров

Температурный режим стабилизировался на уровне отклонений не более $\pm 0,5^\circ\text{C}$, что значительно лучше по сравнению с ручным управлением, где наблюдались колебания до $\pm 2^\circ\text{C}$. Аналогичные улучшения произошли с контролем влажности: её колебания снизились до $\pm 3\%$, тогда как ранее они достигали $\pm 8\%$. Графическое сравнение динамики температуры за трое суток наглядно демонстрирует разницу между ручным управлением, характеризующимся сильными колебаниями, и точной работой системы автоматического управления.

Оптимизация работы климатической техники привела к существенному снижению энергозатрат. Благодаря динамическому регулированию мощности оборудования пиковое потребление энергии удалось сократить с 25 кВт до 18 кВт, что позволило достичь экономии энергоресурсов на уровне 25 %.

Повышение качества хранения продукции стало ещё одним важным результатом внедрения системы. Виртуальные эксперименты показали, что потери зерновых культур за сезон хранения снизились с 12 % до 4 %, что свидетельствует о значительном улучшении условий хранения и минимизации негативного воздействия внешних факторов.

Список литературы

1. Арьков, Д.П. Разработка автоматизированной системы поддержки оптимальных условий хранения картофеля / Д.П. Арьков // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе в условиях цифровой трансформации : Материалы Международной научно-практической конференции, Волгоград, 09–11 февраля 2022 года.– Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2022. – Т. II.–С. 414-420.

2. Прасов, М.Т. Повышение достоверности контроля параметров в АСУ микроклимата с помощью интеллектуальных датчиков / М.Т. Прасов, Д.В. Агарков // Информационные системы и технологии. – 2010. – № 6(62). – С. 123-126.

3. Башняк, С.Е. Автоматизация системы микроклимата в картофелехранилище / С.Е. Башняк // Приоритетные направления развития сельскохозяйственной науки и практики в АПК : материалы всероссийской (национальной) научно-практической конференции : в 3 т. – пос. Персиановский: ФГБОУ ВО«Донской государственный аграрный университет», 2021. – Т. I. –С. 230-234.

References

1. Arykov, D.P. Development of an automated system to support optimal conditions of potato storage / D.P. Arykov // Innovative technologies in agroindustrial complex in the conditions of digital transformation : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Volgograd, February 09-11, 2022. – Volgograd: Volgograd State Agrarian University, 2022. –Vol. II. – Pp. 414-420.

2. Prasov, M.T. Increasing the reliability of parameter control in ACS of microclimate with the help of intelligent sensors / M.T. Prasov, D.V. Agarkov // Information systems and technologies. – 2010. – № 6(62). –Pp. 123-126.

3. Bashnyak, S.E. Automation of the microclimate system in potato storage / S. E. Bashnyak // Priority directions of development of agricultural science and practice in the agroindustrial complex : proceedings of the All-Russian (national) scientific-practical conference : in 3 vol. – Persianovsky settlement: Donskoy State Agrarian University, 2021. – Vol. I. – Pp. 230-234.