

На правах рукописи



ШИРМАНОВА ГУЗЯЛЬ САМИГУЛЛАЕВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И
ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ИНКУБАЦИИ КУР ЯИЧНЫХ КРОССОВ**

Специальность - 4.3.1 Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кемеровский государственный университет» (ФГБОУ ВО «КемГУ»)

Научный руководитель: **Неверов Евгений Николаевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Хаустов Владимир Николаевич**
Доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный аграрный университет», кафедра «Частной зоотехнии», заведующий кафедрой

Осипов Александр Леонидович
Кандидат технических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный университет экономики и управления «НИНХ», кафедра «Информационных технологий», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный аграрный университет имени В.Н. Полецкого»

Защита состоится «20» ноября 2026 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.315.04 при ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» по адресу: 650056 г. Кемерово, б-р Строителей, 47, 2 лекц. ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» (<https://kemsu.ru/science/dissertation-councils/diss-24-2-315-04/protects/72556/>).

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., доцент



Горелкина Алена
Константиновна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Птицеводство занимает ключевое место в структуре агропромышленного комплекса Российской Федерации, обеспечивая население высококачественным белковым продовольствием и внося существенный вклад в продовольственную безопасность страны. В условиях реализации государственных программ, направленных на импортозамещение и устойчивое развитие сельских территорий, особое значение приобретают научно обоснованные, ресурсосберегающие технологии, способные повысить эффективность производства и конкурентоспособность отечественной продукции на внутреннем и внешнем рынках.

Одним из определяющих этапов технологической цепочки в птицеводстве является инкубация яиц. Именно от точности соблюдения режимов инкубации зависят такие показатели, как выводимость, жизнеспособность молодняка, его последующий рост, развитие и продуктивные качества. Вместе с тем на практике в условиях крестьянско-фермерских и личных подсобных хозяйств нередко наблюдается снижение эффективности инкубационного процесса, обусловленное использованием устаревшего оборудования, несоответствием применяемых температурных режимов биологическим требованиям конкретных видов и кроссов птиц, а также недостаточным уровнем автоматизации.

Государственная политика в сфере сельского хозяйства, закреплённая в таких документах, как Стратегия развития сельского хозяйства и агропромышленного комплекса Российской Федерации до 2030 года и последующих стратегических инициативах в рамках национального проекта «Международная кооперация и экспорт» и программы «Комплексное развитие сельских территорий», предусматривает широкое внедрение инновационных решений, направленных на модернизацию производственных процессов, повышение энергоэффективности и обеспечение технологической независимости аграрного сектора. В этой связи актуализируется задача разработки и практической апробации современных инкубационных систем, адаптированных к условиям мелкотоварного и фермерского производства, но при этом отвечающих требованиям точности, надёжности и энергоэффективности.

Степень разработанности темы исследований.

Большой вклад в изучение процессов инкубации и разработки новых режимов и оборудования вложили: Бессарабов Б. Ф., Бурьян М., Говорун А.В., Голдин Ю. С., Дядичкина Л. Ф., Джамил Х. Т. Д., Забудский Ю. И., Зипер А.Ф., Косьяненко С. В., Кривопишин И. П., Кузьмина Т.Н., Огородний Ю. М., Орлов М. В., Отрыганьев Г. К., Отрыганьева А. Ф., Попов В.М., Постригань С.А., Сахно О. Н., Сидоренко Л. И., Судаков А.Н., Aziz D.A., Cengel Y.A., Geng L., Hu Y., Li Y., Lourens A., Meijerhof R., Nakaguchi V., Nazir R., Niranjan L., Rahman M., Unik M., Xiao Z., Xi J., Xu Q.L., Zhang Q.

Целью исследования является

Исследование физических методов и реализация технологических решений, способствующих оптимизации ресурсозатрат и повышению выводимости при инкубации яиц кур яичных кроссов.

Задачи исследования:

- разработать систему компьютерного зрения для анализа внешнего вида яиц сельскохозяйственной птицы перед инкубацией;
- разработать алгоритм расчета тепловых процессов при разработке энергосберегающего оборудования для инкубации яиц сельскохозяйственной птицы;
- провести расчёт теплообмена нестационарного нагрева куриного яйца при конвекции для оптимизации режимов работы инкубаторов сельскохозяйственных птиц;
- разработать лабораторный образец инкубатора для выведения сельскохозяйственной птицы;
- провести анализ экономической эффективности внедрения инкубатора для выведения сельскохозяйственной птицы.

Объект исследования: технология инкубации яиц кур яичных кроссов, включающая процессы отбора, инкубирования и контроля параметров инкубации.

Предмет исследования: влияние применения системы компьютерного зрения, алгоритмов адаптивного управления микроклиматом и тепловизионного анализа на эффективность инкубации: выводимость и экономичность процесса.

Научная новизна работы.

Диссертационная работа содержит элементы научной новизны в рамках пунктов 2, 6, 14 и 16 паспорта научной специальности ВАК 4.3.1. «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса».

Научная новизна заключается в следующем:

- разработан алгоритм автоматизированной оценки качества яиц сельскохозяйственной птицы, который вносит вклад в развитие теории инженерных систем, закладывает основы нового научного направления на стыке агроинженерии и цифровых технологий за счёт внедрения методов компьютерного зрения и машинного обучения в процессы контроля качества инкубационного яйца;
- предложен оригинальный метод для расчёта локальных температурных полей в объёме инкубационной камеры на основе вычисления конвективного теплообмена, учитывающий неравномерность тепловыделения по зонам камеры инкубатора;
- разработан метод расчета нестационарного теплообмена куриного яйца в условиях вынужденной конвекции на основе аналитического решения уравнения теплопроводности, метод учитывает переходный режим теплообмена и применим для первых суток инкубации.

Техническая новизна работы подтверждена патентом на полезную модель № 238376 «Устройство для инкубации сельскохозяйственных птиц» и

свидетельством о регистрации программы для ЭВМ RU 2024682622, № 2024681903 «Программа управления работой устройства инкубации яиц сельскохозяйственной птицы».

Рабочая гипотеза: внедрение технологии инкубации куриных яиц с применением системы компьютерного зрения, алгоритмов адаптивного управления и тепловизионного анализа позволит повысить выводимость молодняка, снизить уровень брака и оптимизировать ресурсозатраты по сравнению с традиционными методами инкубации.

Теоретическая и практическая значимость работы.

В ходе работы разработан лабораторный образец системы компьютерного зрения для оценки качества яиц сельскохозяйственной птицы. Сконструирован лабораторный образец инкубатора для вывода сельскохозяйственной птицы с возможностью применения технологии Интернета вещей (IoT), вариативностью вида яиц для инкубации и их количества. Определены и теоретически обоснованы оптимальные режимы работы в процессе искусственной инкубации кур яичных кроссов.

Проведена апробация технологии инкубации куриных яиц с применением системы компьютерного зрения и тепловизионного анализа, утверждены акты ее внедрения на предприятиях ООО «Племенная птицефабрика «Снежинская»» и МУСП «Кемеровская инкубаторно-птицеводческая станция».

Полученные в диссертационной работе результаты применяются в образовательном процессе ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» при подготовке студентов по направлениям 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 02.03.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии», 09.03.03 «Прикладная информатика», 15.04.06 «Мехатроника и робототехника», 09.04.03 «Прикладная информатика».

Методология и методы исследования.

Диссертационная работа включает разделы теоретической и практической части работы. Для проведения работ по разработке структуры конструкции и управлению ее процессами применялись современные методы 3D-моделирования и программирования. Для статистической обработки экспериментов и получаемых результатов использовались современные методики анализа.

Положения, выносимые на защиту:

- оригинальный алгоритм обработки и анализа изображений яиц, включающий автоматическую сегментацию объектов, позволяющий сформировать по размерам оптимальные партии яиц для инкубации;
- метод и программное обеспечение для расчёта локальных температурных полей в объёме инкубационной камеры, учитывающие различное тепловыделение, исходя из материалов камеры инкубатора и объема инкубационных яиц;
- оригинальная конструкция лабораторного образца автоматизированного инкубатора с микроконтроллерным управлением на базе

платформы Arduino (UNO/Mega), обеспечивающая поддержание температуры, контроль влажности в допустимых пределах, автоматическую вентиляцию и периодическое переворачивание яиц с минимизацией механического воздействия на эмбрионы.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на научно-технических конференциях: «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» XIII, XIV Международной конференции студентов, аспирантов, молодых ученых (Томск, 2024, 2025), «Пожарная безопасность, системы жизнеобеспечения, промышленные технологии: проблемы и перспективы» I, II Международной научно-практической конференции (Кемерово, 2024, 2025), «Холодильная техника, инженерные системы и биотехнологии» VI, VII Национальной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Кемерово, 2024, 2025), «Актуальные проблемы науки и практики в исследованиях молодых ученых» I Международной научно-практической конференции (Новосибирск, 2024), III, IV Международного Симпозиума, посвященного 90-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ, основателя научной школы Льва Александровича Остроумова (Кемерово, 2024, 2025), «Инновационные технологии производства конкурентоспособной, экологически безопасной продукции животноводства» Международной научно-практической конференции (Чита, 2024), «Наука и образование» XVII Международной научной конференции (Красноярск, 2025), Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию Победы в Великой Отечественной войне и 85-летию города трудовой доблести Ишимбая (Уфа, 2025), «Цифровая трансформация: взгляд в будущее» Научно-технологическая конференции (Санкт-Петербург, 2025), «Наука и образование» XVIII Международной научной конференции (Кемерово, 2025), «Россия молодая» XVII, XVIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Кемерово, 2025, 2026), XIII, XIV Инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука, инновации» (Кемерово, 2025, 2026), «Современные тенденции развития IT-индустрии» IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Мариуполь, 2026).

Публикации. Содержание диссертационной работы опубликовано в 29 научных работах, в том числе 1 публикация в изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus, 6 статей – в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 22 публикации – в материалах конференций, также получено 1 свидетельство РФ на программу ЭВМ и 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложений. Содержание работы изложено на 170 страницах машинописного текста, содержит 28 таблиц, 67 рисунков, 6 приложений. Список литературы включает 128 источников. Общий объем диссертации составляет 184 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи, приведена научная новизна, показана практическая значимость.

В первой главе сделан обзор научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему. Рассмотрен анализ существующих способов, технологии и технических средств инкубации и современных технических решений бытовых инкубаторов, проведена их сравнительная оценка и дано обоснование перспектив дальнейшей разработки инновационных систем.

Во второй главе рассмотрены вопросы, относящиеся к организации и выполнению работы, выбору объектов и методов исследований. Общая схема проведения исследований приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема выполнения диссертационной работы

В третьей главе проводится обоснование выбора технических средств при разработке системы компьютерного зрения, описываются алгоритмы анализа изображений, выделение контуров, измерение параметров.

Программно-аппаратный комплекс, разработанной системы компьютерного зрения, представлен на рисунке 2.

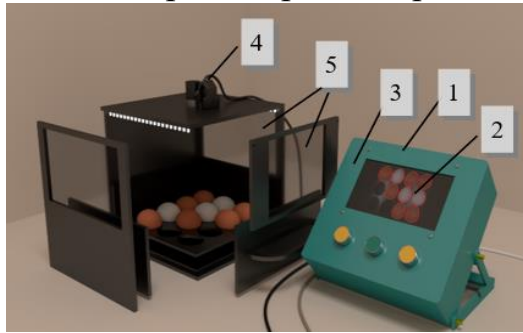
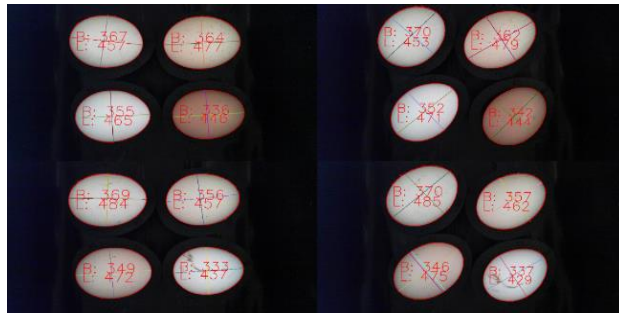


Рисунок 2 - Компьютерная модель системы компьютерного зрения: 1 -управляющий элемент микрокомпьютер Raspberry Pi4B; 2- жидкокристаллический экран HDMI LCD (B); 3 - корпус для микрокомпьютера и экрана; 4 - цифровая видеокамера USB-камера LifeCam Studio; 5 - смотровая камера для обеспечения постоянного освещения и взаимного расположения видеокамеры и анализируемого объекта.

Разработанная система компьютерного зрения позволила получить снимки образцов куриных яиц (рисунок 3) в положениях, при которых линии продольных (больших) диаметров были близки к горизонтальному положению, и в положениях, при которых линии больших диаметров были близки к положению под углом 45° к вертикали. Разработана и протестирована



программа при различных значениях пороговой яркости пикселей. Результаты анализа свидетельствуют об отсутствии влияния помех на точность обнаружения контуров образцов.

В работе использовались две методики определения параметров и категории яиц: одна основана на физическом измерении параметров яиц, а вторая - с применением

Рисунок 3 - Обработанные снимки образцов при минимальных значениях уровня яркости 25 и 50

технологии компьютерного зрения.

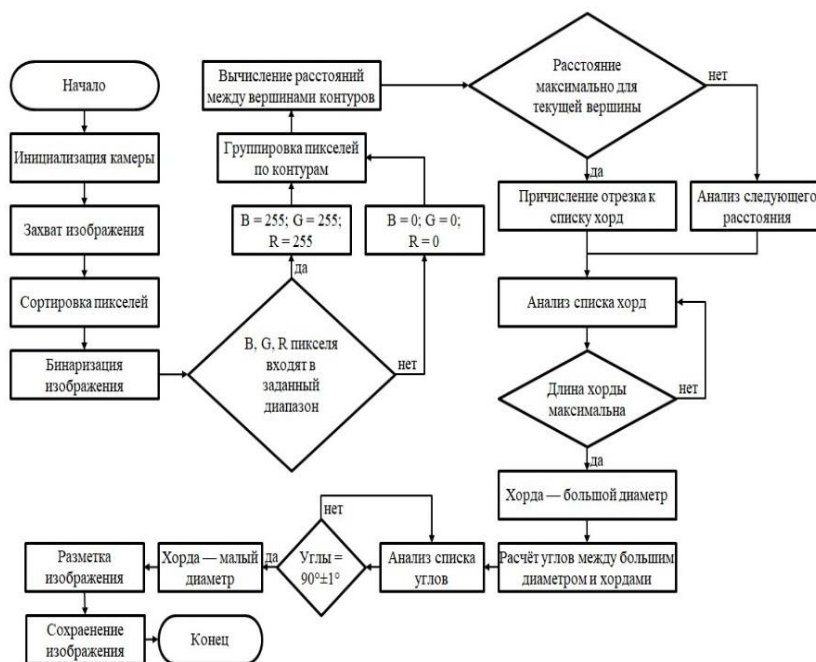


Рисунок 4 – Алгоритм работы управляющей программы системы компьютерного зрения

Алгоритм работы управляющей программы системы компьютерного зрения представлен на рисунке 4. Он обеспечивает комплексное решение задачи количественного анализа геометрических характеристик объектов на цифровых изображениях.

Средняя точность полученных, с помощью системы компьютерного зрения, измерений продольных (больших) и поперечных (малых)

диаметров яйца составила 99,2%.

Предложенная система компьютерного зрения позволяет осуществлять автоматическую классификацию яиц по категориям с учётом ГОСТ, размера и формы, а также оценку пригодности яиц к последующей инкубации. В работе представлены рекомендации по размещению яиц в инкубаторе (таблица 1).

Таблица 1 – Рекомендации по размещению яйца в инкубаторе

Критерии группировки	Масса, г.	Рекомендации по размещению в инкубаторе
Группа 1 (мелкие)	45,0–49,9	Ближе к стенкам инкубатора
Группа 2 (средние)	50,0–54,9	Средняя зона инкубатора
Группа 3 (крупные)	55,0–59,9	Центр инкубатора

В четвертой главе представлена комплексная методология создания энергоэффективного инкубационного оборудования, базирующаяся на расчёте тепловых процессов. Для расчёта физических величин, используемых для описания процессов в инкубационной камере, написан программный код, реализующий алгоритм, представленный на рисунке 4.

В таблице 2 приводятся физические величины и значения, используемые в разработке автоматизированного алгоритма расчета тепловых процессов.

Таблица 2 – Физические величины и значения, для автоматизированного алгоритма расчета тепловых процессов

Величина	Значение
Начальная температура воздуха, T_0	296,78 К
Значение температуры, T_{yst}	317,21 К
Мощность теплового воздействия, P	120 Вт
Значение теплоёмкости воздуха, C_e	200,5 Дж/(кг·К)
Значение теплоёмкости лотка с яйцами, $C_{я}$	0,00195 Дж/(кг·К)
Коэффициент теплопередачи стенок корпуса, k_0	0,04 Вт/(м ² ·К)
Коэффициенты теплопередачи яиц, k_e	26,2 Вт/(м ² ·К).

В разработанном алгоритме используется программный код, написанный на языке программирования Python 3.9.1, в котором температурный отклик вычислялся по формуле (1):

$$T(t) = T_0 + KP \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (1)$$

где: $T(t)$ - температура в момент времени t (К), T_0 - начальная температура (К), P - мощность нагревателя (ступенчатое воздействие) (Вт), e - основание натурального логарифма, K - коэффициент усиления (°С/Вт) $K = \frac{T_{yst} - T_n}{P}$,

Для учета тепловых потерь от перепада температур используется в расчетах закон Фурье (2):

$$Q = k_0 \frac{A_0}{d} \Delta T, \quad (2)$$

где Q - величина стационарного теплового потока (Вт), k_0 - коэффициент теплопроводности материала (Вт/(м·К)), A_0 - площадь поперечного сечения ограждающей конструкции (м²), d - толщина ограждающей конструкции (м),

ΔT - разность температур между внутренней и наружной поверхностями конструкции (К).

На рисунках 5, 6 представлены результаты автоматизированного расчета для проверки работы разработанной программы с разной комбинацией задаваемых параметров по расчёту термодинамических величин, характеризующих тепловые процессы в инкубационной камере.

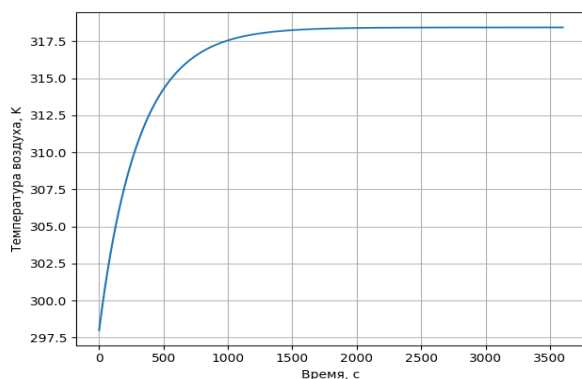


Рисунок 5 – Графическая визуализация программного расчёта параметров тепловых процессов

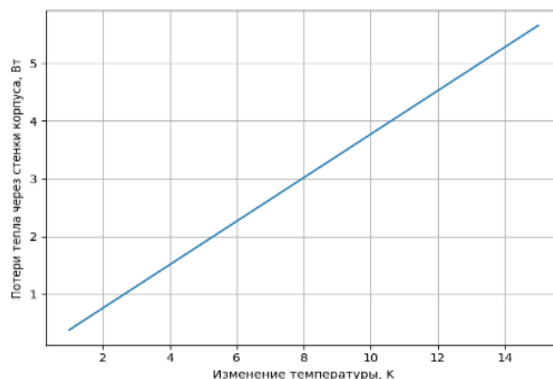
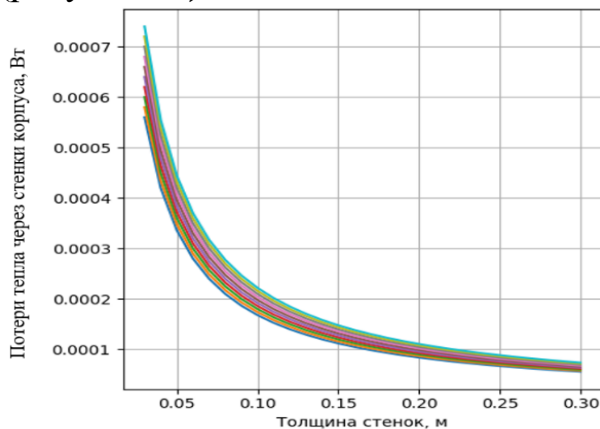
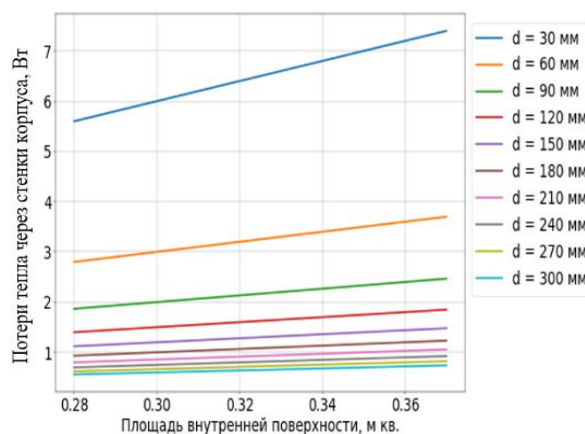


Рисунок 6 – Графическая визуализация программного расчёта тепловых потерь

В ходе проведенного анализа влияния геометрических параметров на теплопотери было выявлено две ключевые закономерности: гиперболическая зависимость теплопотерь от толщины изоляционного слоя (рисунок 7а) и линейная зависимость теплопотерь от площади поверхности объекта (рисунок 7б).



а)



б)

Рисунок 7 - Зависимость тепловых потерь через ограждающие конструкции инкубатора: а - от толщины изоляционного слоя; б - от площади поверхности

Анализ данных показал, что оптимальная толщина изоляции составляет около 0,15 м. Эти закономерности наглядно демонстрируют, насколько критически важны геометрические параметры при проектировании энергоэффективных систем.

Для оптимизации режимов работы инкубаторов был проведен расчёт теплообмена нестационарного нагрева куриного яйца при конвекции. Параметрический анализ проведён для диаметров 0,037, 0,038, 0,039, 0,040, 0,041 м и скоростей воздушного потока 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м/с. Полученные

данные учитывают переходный режим теплообмена ($0,13 < Bi < 0,86$) и применимы для первых суток инкубации. Установлено существенное влияние геометрического размера на динамику прогрева. При скорости воздушного потока 2,0 м/с яйцо диаметром 37 мм достигает температуры 35 °С за 45 минут, тогда как для яйца диаметром 41 мм этот процесс занимает 70 минут. Разница во времени прогрева составляет 35%. На рисунке 8 представлены графические визуализации программного расчета температурных профилей в центре яйца, отражающие динамику прогрева от начальной температуры 28,0 °С до температуры инкубатора 37,5 °С

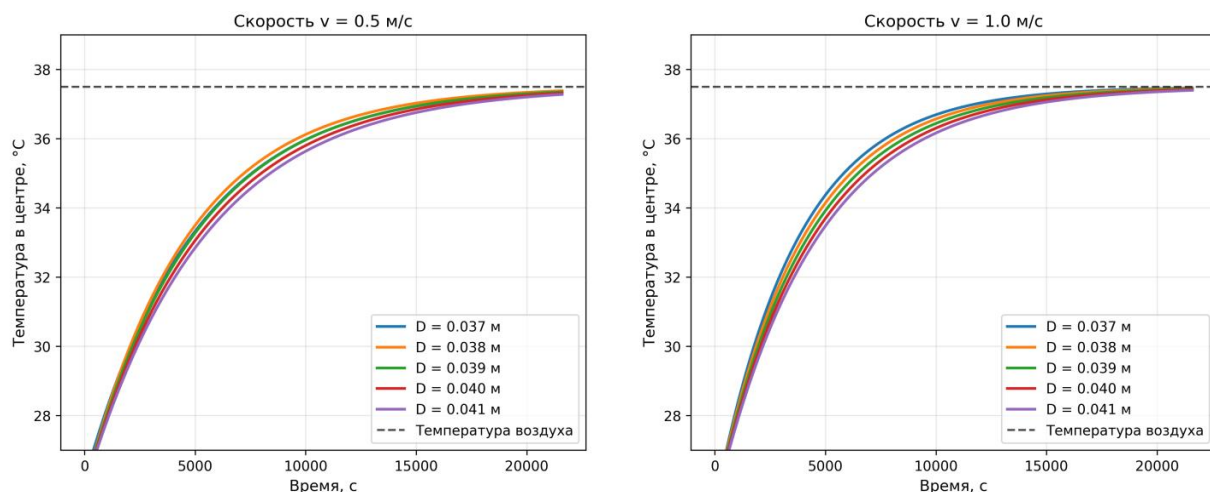


Рисунок 8 – Температурные профили в центре яйца для разных скоростей и диаметров

Выявлен нелинейный характер влияния скорости воздуха. Наиболее существенное сокращение времени прогрева (на 35-40%) наблюдается при увеличении скорости от 0 до 1,0 м/с. Дальнейшее повышение скорости до 2,0 м/с обеспечивает дополнительное ускорение лишь на 10-15%. Статистический анализ подтвердил нелинейный характер влияния скорости воздуха, что обосновывает выбор скорости 1,0 м/с как оптимальной (рисунок 9).

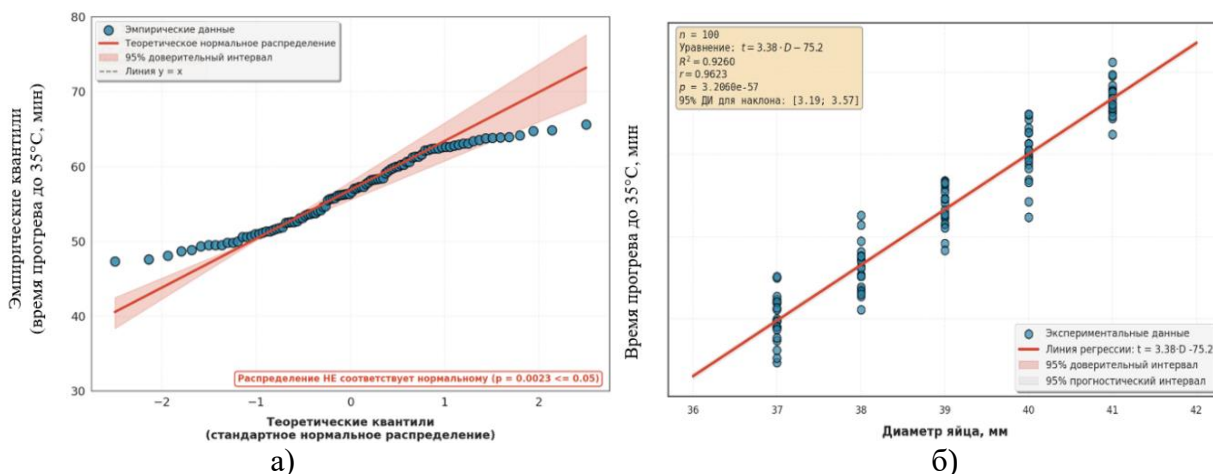


Рисунок 9: а – Q-Q график анализа распределения времени прогрева яйца до 35 °С (пример для скорости 1,0 м/с), б – линейная регрессия зависимости времени прогрева яйца до 35 °С от его диаметра (при скорости воздуха 1,0 м/с)

Скорость воздушного потока 1,0 м/с обеспечивает баланс между интенсивностью теплообмена и энергетическими затратами, сокращая время прогрева на 35–40% по сравнению с режимом естественной конвекции. В работе были рекомендованы параметры инкубации для смешанной партии яиц диаметром 37–41 мм (рисунок 10).

ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ ВСЕХ КОМБИНАЦИЙ СКОРОСТЕЙ И ДИАМЕТРОВ

D (м)	v (м/с)	h (Вт/м ² ·°C)	Bi	lambda _d	Al
0.037	0.5	11.99	0.7396	1.3525	1.1978
0.037	1.0	16.11	0.9935	1.5708	1.2732
0.037	1.5	19.27	1.1883	1.5708	1.2732
0.037	2.0	21.93	1.3526	1.5708	1.2732
0.038	0.5	11.99	0.7596	1.4320	1.2236
0.038	1.0	16.11	1.0203	1.5708	1.2732
0.038	1.5	19.27	1.2204	1.5708	1.2732
0.038	2.0	21.93	1.3891	1.5708	1.2732
0.039	0.5	11.99	0.7796	1.4320	1.2236
0.039	1.0	16.11	1.0472	1.5708	1.2732
0.039	1.5	19.27	1.2526	1.5708	1.2732
0.039	2.0	21.93	1.4257	1.5708	1.2732
0.040	0.5	11.99	0.7995	1.4320	1.2236
0.040	1.0	16.11	1.0740	1.5708	1.2732
0.040	1.5	19.27	1.2847	1.5708	1.2732
0.040	2.0	21.93	1.4623	1.5708	1.2732
0.041	0.5	11.99	0.8195	1.4320	1.2236
0.041	1.0	16.11	1.1009	1.5708	1.2732
0.041	1.5	19.27	1.3168	1.5708	1.2732
0.041	2.0	21.93	1.4988	1.5708	1.2732

Рисунок 10 - Параметры для всех комбинаций скоростей и диаметров

лабораторного образца инкубатора. Отличительной особенностью разработанного инкубатора в сравнении с его аналогами является простота программирования и расширения функционала за счёт использования микроконтроллера Iskra UNO и среды разработки Arduino IDE. Схема инкубатора представлена на рисунке 11.

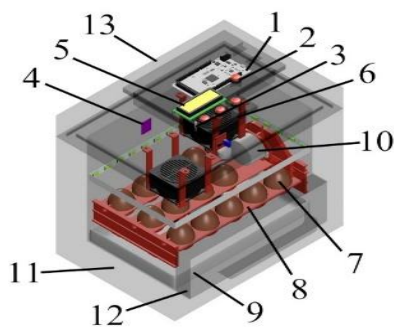


Рисунок 11 - Лабораторный образец инкубатора с двумя нагревателями: 1 - управляющий элемент (Iskra UNO); 2 - тактовая кнопка; 3 - датчик температуры нагревателей (DS18B20); 4 - многофункциональный датчик температуры и влажности (BME280); 5 - символьный экран 16x2; 6 - нагреватель PTC; 7 – яйца; 8 - поворачивающий механизм; 9 - резервуар с водой; 10 – серводвигатель; 11 – корпус; 12 - крышка для резервуара с водой; 13 - крышка корпуса.

На рисунке 12 представлена схема подключения различных элементов лабораторного образца инкубатора.

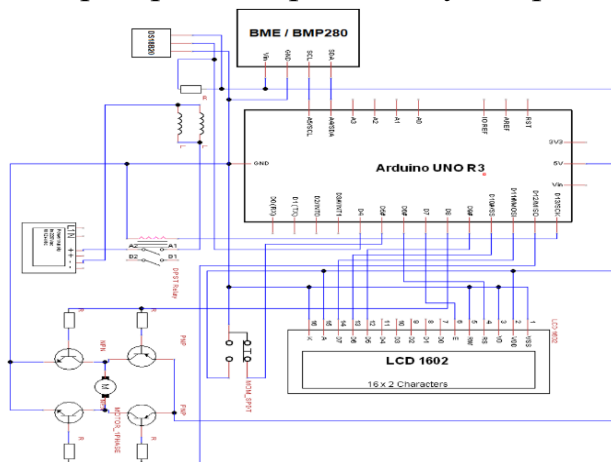


Рисунок 12 - Схема подключения различных элементов прототипа инкубатора: Arduino UNO R3 - управляющий микроконтроллер (аналог Iskra UNO, используемого в работе); LCD 1602 - символьный экран; однофазный мотор M, подключённый к четырём транзисторам - серводвигатель; DPST Relay - реле; MOM SPDT - тактовая кнопка; L1N Power supply - источник напряжения; DS18B20 - термодатчик; BME/BMP280 – многофункциональный датчик температуры и влажности.

Разработанный лабораторный образец инкубатора был испытан при различном количестве встроенных нагревателей. На рисунке 13 представлен график нагрева инкубатора с четырьмя нагревателями в течение суток (рис. 13а) и двумя нагревателями (рис. 13б).

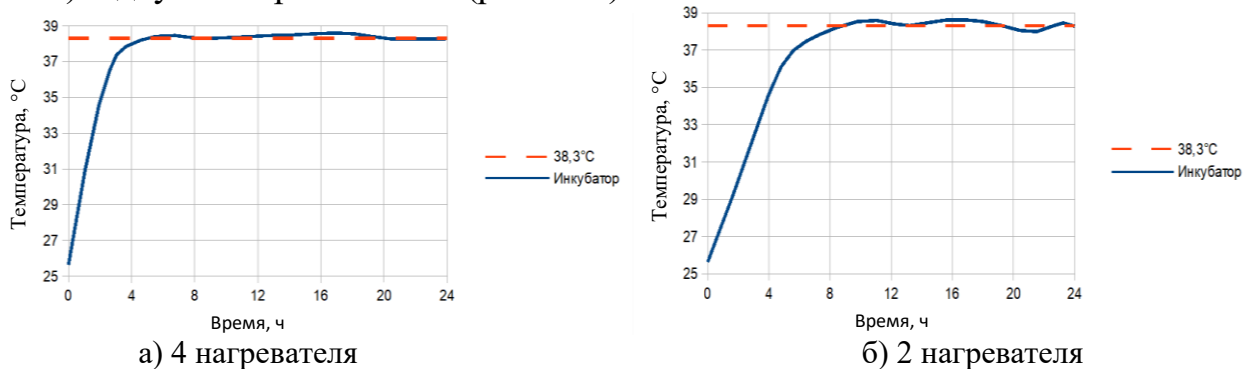


Рисунок 13 - График нагрева для инкубатора

График наглядно иллюстрирует зависимости температуры инкубатора от времени в зависимости от количества нагревателей.

В инкубаторе использован ПИД-регулятор. Экспериментальным путем определено, что значения коэффициентов PID-регулирования $K_p = 0,2$, $K_i = 0,1$, $K_d = 0,01$ являются оптимальными. Полученные количественные зависимости могут быть использованы для инженерного проектирования энергоэффективных инкубационных систем.



Рисунок 14 – Алгоритм комплексной технологии инкубации куриных яиц

В пятой главе диссертационного исследования проведена апробация технологии инкубации куриных яиц с применением системы компьютерного зрения и тепловизионного анализа (рисунок 14).

Представленный алгоритм состоит из следующих этапов:

Этап 1. Загрузка яиц в систему компьютерного зрения и их сортировка. На этом этапе система компьютерного зрения отбраковывает яйца с трещинами, аномальной формой, загрязнениями, а также яйца группировались по массе и располагались согласно рекомендациям для равномерного прогрева.

Этап 2. Закладка и инкубация выбранной группы яиц в инкубаторе.

Режимы по периодам:

1-7 сутки: температура: $+37,8...+38,0$ °C; влажность: 50...55%;
перевороты: 6–12 раз в сутки (автоматически).

8-14 сутки: температура: $+37,6...+37,8$ °C; влажность: 45...50%;
перевороты: 6–8 раз в сутки.

15-18 сутки: температура: $+37,4...+37,6$ °C; влажность: 50...55%;
перевороты: прекращают за 24-48 ч. до переноса

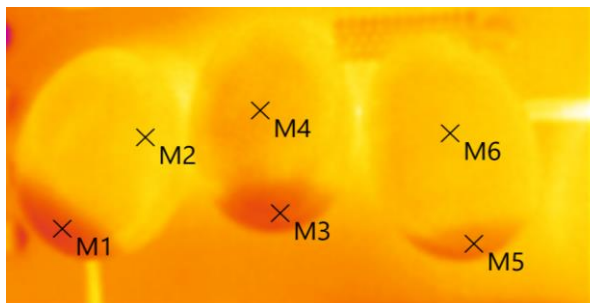


Рисунок 15 – Термограмма куриных яиц:
температура в точках M2, M4 и M6
составляла $+37,6...+38,2$ °C, в точках M1,
M3 и M5 температура составляла
 $+37,2...+37,6$ °C

Этап 3. Анализ тепловизором яиц после 18 дней инкубации. На данном этапе проводится фотофиксация каждого яйца тепловизором и анализ термограмм для выявления «холодных» яиц (замедленное развитие эмбриона) и обнаружение перегретых яиц (риск перегрева эмбриона) с последующей отбраковкой (рисунок 15).

Этап 4. Перенос и выведение (19–21 сутки).

Объектом исследования были яйца кур яичных кроссов, разделенные на 3 группы по 30 штук в каждом повторении:

группа 1 (контроль): стандартная инкубация без дополнительного контроля.

группа 2 (СКЗ): сортировка яиц по морфологическим параметрам перед закладкой.

группа 3 (СКЗ + тепловизор): полная схема - сортировка СКЗ+тепловизионный контроль на 5-й 10-й и 18-й день.

В таблице 3 приведены результаты эксперимента по 3 группам. Доказано, что комплексное применение системы компьютерного зрения на этапе закладки яиц и тепловизионного контроля в момент перевода в выводную камеру позволило повысить процент выводимости на 20,0% по сравнению с группой 1, снизить брак до 18-го дня на 20,0% и полностью исключить брак в выводной камере.

Таблица 3 - Показатели результатов вывода по группам

Показатель	Группа 1 (контроль)	Группа 2 (СКЗ)	Группа 3 (СКЗ + тепловизор)
Заложено яиц, шт.	30	30	30
Выведено цыплят, голов	$23 \pm 1,0$	$27 \pm 1,0$	$29 \pm 0,0$
Процент выводимости, %	$76,7 \pm 3,3$	$90,0 \pm 3,3$	$96,7 \pm 1,1$
Средняя масса цыплёнка, г	$38,1 \pm 1,0$	$40,7 \pm 0,8$	$44,0 \pm 0,7$
Выход живой массы, %	$66,4 \pm 1,1$	$67,2 \pm 0,9$	$67,7 \pm 0,8$
Брак до 18-го дня, шт.	$5,0 \pm 1,0$	$2,0 \pm 1,0$	$1,0 \pm 0,0$
Брак в выводной камере, шт.	$2,0 \pm 0,0$	$1,0 \pm 0,0$	0
Цыплята с оценкой «отлично», %	$63,3 \pm 5,8$	$80,0 \pm 4,1$	$93,3 \pm 2,3$
t-критерий	-	0,2657	0,4231
p-значения	-	0,0079	0,0067
Уровни значимости различий	-	0,0506	0,0508

Таким образом, разработанный лабораторный образец, с учетом предлагаемой оптимизации конструкции инкубатора и параметров его работы (температуры, влажности, вентиляции), а также применяемой комплексной технологии инкубации куриных яиц позволяет достичь до 97% выводимости яиц.

Проведённый анализ экономической эффективности внедрения лабораторного инкубатора для выведения сельскохозяйственной птицы подтверждает высокую целесообразность и перспективность данного решения для малых фермерских хозяйств и средних птицеводческих предприятий. Рекомендуемая базовая цена производимого инкубатора при серийном производстве (при желаемой прибыли 15%-35% в год) составляет 22000-23000 рублей. Повышение выводимости на 5–12 % даёт дополнительный доход в размере 40,6–46,0 тыс. рублей в год (для инкубатора вместимостью 100 яиц), что делает его конкурентоспособным и экономически эффективным по сравнению с существующими аналогами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. Разработана система компьютерного зрения для автоматизированного определения большого и малого диаметров куриных яиц. Сравнение значений размеров образцов посредством системы компьютерного зрения показало высокую точность определения большого и малого диаметра яиц. Средняя точность измерений составила 99,2%. Данная система компьютерного зрения может быть применена для автоматической классификации яиц, а также для автоматической оценки пригодности яиц, к последующей инкубации, исходя из соотношений размеров.

2. Разработан программный алгоритм расчета тепловых процессов при разработке энергосберегающего оборудования для инкубации яиц сельскохозяйственной птицы. Расчёт параметров тепловых процессов в инкубаторе проведён с учётом ключевых физических параметров системы: мощности нагревателя 120 Вт, площади ограждающих конструкций 0,254 м², теплоёмкости воздуха 200,5 Дж/(кг·К) и лотка с яйцами 0,00195 Дж/(кг·К). Коэффициенты теплопередачи установлены для стенок корпуса 0,04 Вт/(м²·К) и яиц 26,2 Вт/(м²·К). Установлено, что 95% установившейся температуры достигается за 18 минут, что соответствует трём постоянным времени системы.

3. Проведен расчёт теплообмена нестационарного нагрева куриного яйца при конвекции для оптимизации режимов работы инкубаторов сельскохозяйственных птиц. Полученные данные учитывают переходный режим теплообмена ($0,13 < Bi < 0,86$) и применимы для первых суток инкубации. Установлено существенное влияние геометрического размера яиц на динамику прогрева. При скорости воздуха 2,0 м/с яйцо диаметром 37 мм достигает температуры 35°C за 45 минут, тогда как для яйца диаметром 41 мм этот процесс занимает 70 минут. Полученные количественные зависимости для 20 комбинаций параметров могут быть использованы для инженерного проектирования энергоэффективных инкубационных систем.

4. Разработана технология инкубации яичных кроссов и оборудование для ее реализации. С учетом предлагаемой оптимизации конструкции лабораторного образца инкубатора и параметров его работы (температуры, влажности, вентиляции), а также технологии инкубации куриных яиц с применением системы компьютерного зрения и тепловизионного анализа позволяет достичь 97% выводимости яиц.

5. Проведённый анализ экономической эффективности внедрения лабораторного инкубатора для выведения сельскохозяйственной птицы подтверждает высокую целесообразность и перспективность данного решения для малых и средних птицеводческих хозяйств. Рекомендуемая базовая цена производимого инкубатора при серийном производстве (при желаемой прибыли 15% - 35% в год) составляет 22000 - 23000 рублей. Повышение выводимости на 5–12 % даёт дополнительный доход в размере 40,6 –46,0 тыс. рублей. в год (для инкубатора вместимостью 100 яиц).

Основные публикации по теме диссертации:

В журналах перечня ВАК:

1. Неверов Е.Н. Разработка инкубатора на базе микроконтроллера Arduino для выведения сельскохозяйственной птицы / Е.Н. Неверов, Г.С. Ширманова, А.К. Горелкина, А.А. Владимиров // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2024. Т. 16. № 4. С. 122-130.

2. Ширманова Г.С. Обзор методов машинного обучения и компьютерного зрения в технологии инкубации яиц сельскохозяйственных птиц / Г.С. Ширманова, Е.Н. Неверов, Е.В. Николаева, А.А. Владимиров // Вестник АПК Верхневолжья. 2024. № 4 (68). С. 92-99.

3. Неверов Е.Н. Применение микроконтроллера Atmega в управлении работой инкубатора для выведения сельскохозяйственной птицы / Е.Н. Неверов, Г.С. Ширманова, А.А. Владимиров, П.С. Руднев // АПК России. 2025. Т. 32. № 1. С. 71-81.

4. Ширманова Г.С. Применение методов математического моделирования тепловых процессов при разработке энергосберегающего оборудования для инкубации яиц сельскохозяйственной птицы / Г.С. Ширманова, Е.Н. Неверов, Е.В. Николаева, А.А. Владимиров, А.М. Осинцев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2025. № 11 (253). С. 63-71.

5. Ширманова Г.С. Разработка системы компьютерного зрения для неразрушающей оценки качества и классификации куриных яиц / Г.С. Ширманова, Е.Н. Неверов, А.А. Владимиров, А.М. Осинцев, П.С. Руднев // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2025. № 3 (59). С. 158-168.

6. Неверов Е. Н. Математическое моделирование нестационарного нагрева куриного яйца при вынужденной конвекции / Е.Н. Неверов, Г.С. Ширманова, А.А. Владимиров, А.Л. Майтаков, А.Ю. Соколова// Вестник

Алтайского государственного аграрного университета. - 2026. - №7(261). - с. 67-76.

В журналах перечня Scopus:

1. Neverov E.N. Developing and testing a computer vision module for assessing the quality of poultry products in agroindustrial production /E.N. Neverov, G.S. Shirmanova, E.V. Nikolayeva, A.A. Vladimirov, A.M. Osintsev // Journal of Global Innovations in Agricultural Sciences (ISSN 2788-4538). 2026 (13) – DOI:10.22194/JGIAS/26.1940

Статьи в конференциях:

1. Пангуров В.В. Современные методы качественного анализа куриных яиц / В.В. Пангуров, А.Д. Тюнин, Г.С. Ширманова // В книге: Пожарная безопасность, системы жизнеобеспечения, промышленные технологии: проблемы и перспективы. Сборник тезисов I Международной научно-практической конференции. Кемерово, 2024. С. 195-197.

2. Ширманова Г.С. Анализ существующих инкубаторов для искусственной инкубации яиц сельскохозяйственных птиц / Г.С. Ширманова, А.А. Владимиров, Е.Н. Неверов // В книге: Пожарная безопасность, системы жизнеобеспечения, промышленные технологии: проблемы и перспективы. Сборник тезисов I Международной научно-практической конференции. Кемерово, 2024. С. 225-226.

3. Ширманова Г.С. Роль машинного обучения и компьютерного зрения в повышении эффективности технологий инкубации яиц / Г.С. Ширманова, П.П. Молотков, А.В. Молоткова // В сборнике: Ресурсосберегающие технологии в контроле, управлении качеством и безопасности. Сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов, молодых ученых. Томск, 2024. С. 290-293.

4. Схаплок Р.Ю. Оптимизация процесса инкубации куриных яиц на крестьянско-фермерских хозяйствах / Р.Ю. Схаплок, Е.Н. Неверов, Г.С. Ширманова // В сборнике: Актуальные проблемы науки и практики в исследованиях молодых ученых. Сборник I международной научно-практической конференции. Новосибирск, 2024. С. 382-385.

5. Ширманова Г.С. От простейших устройств до высокотехнологичных систем: история развития и роль инкубаторов в птицеводстве / Г.С. Ширманова // В сборнике: Холодильная техника, инженерные системы и биотехнологии. Сборник тезисов VI Национальной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Кемерово, 2024. С. 424-427.

6. Ширманова Г.С. Технология автоматизированной инкубации яиц сельскохозяйственной птицы / Г.С. Ширманова, Е.Н. Неверов, А.А. Владимиров // В сборнике: Холодильная техника, инженерные системы и биотехнологии. Сборник тезисов VI Национальной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Кемерово, 2024. С. 428-430.

7. Ширманова Г.С. К вопросу эффективного применения тепловых насосов в птицеперерабатывающей промышленности / Г.С. Ширманова, Е.Н. Неверов, Р.Ю. Схаплок // В книге: Пищевые технологии. Сборник тезисов III Международного Симпозиума, посвященного 90-летию со дня рождения

доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ, основателя научной школы Льва Александровича Остроумова. Кемерово, 2024. С. 561-564.

8. Родионова А.Ю. Производство мяса индейки в Кемеровской области / А.Ю. Родионова, Е.Н. Неверов, Г.С. Ширманова// В сборнике: Инновационные технологии производства конкурентоспособной, экологически безопасной продукции животноводства. Материалы международной научно-практической конференции. Чита, 2024. С. 62-66.

9. Ширманова Г.С. Моделирование тепловых процессов в прототипе устройства инкубации яиц сельскохозяйственной птицы / Г.С. Ширманова, П.С. Руднев, Е.Н. Неверов, Е.В. Николаева, А.А. Владимиров, А.Ю. Соколова //В книге: Пищевые технологии. Сборник тезисов IV Международного симпозиума, посвященного 91-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ, основателя научной школы Льва Александровича Остроумова. Кемерово, 2025. С. 540-542.

10. Соколова А.Ю. Разработки терморегулятора для малогабаритного инкубатора / А.Ю. Соколова, Г.С. Ширманова, Е.Н. Неверов//В сборнике: Пожарная безопасность, системы жизнеобеспечения, промышленные технологии. Сборник тезисов II Международной научно-практической конференции. Кемерово, 2025. С. 295-296.

11. Ширманова Г.С. Применение компьютерного зрения в птицеводстве: экологические аспекты и управление качеством продукции / Г.С. Ширманова, П.П. Молотков, А.В. Молоткова // В сборнике: Пожарная безопасность, системы жизнеобеспечения, промышленные технологии. Сборник тезисов II Международной научно-практической конференции. Кемерово, 2025. С. 210-213.

12. Ширманова Г.С. Разработка системы компьютерного зрения для анализа яиц сельскохозяйственной птицы перед инкубацией / Г.С. Ширманова, Е.В. Николаева, П.С. Руднев, А.А. Владимиров//В книге: XIII Инновационный конвент "Кузбасс: образование, наука, инновации", посвященный 80-й годовщине победы в Великой Отечественной войне 1941-1945 годов. Сборник тезисов докладов. В 2-х частях. Кемерово, 2025. С. 170-172.

13. Ширманова Г.С. Цифровизация птицеводства: использование машинного обучения для повышения производительности и устойчивости отрасли / Г.С. Ширманова, П.П. Молотков, А.В. Молоткова // В сборнике: Наука и образование. Сборник трудов участников XVII Международной научной конференции. Красноярск, 2025. С. 508-513.

14. Ширманова Г.С. Использование технологий искусственного интеллекта для повышения эффективности агропромышленного комплекса / Г. С. Ширманова, П.П. Молотков, А.В. Молоткова // В сборнике: Россия молодая. Сборник материалов XVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Кемерово, 2025. С. 74344.1-74344.7.

15. Руднев П.С. Применение компьютерного зрения для технологий агропромышленного комплекса / П.С. Руднев, Е.В. Николаева, А.А. Владимиров, Г.С. Ширманова // В сборнике: Научные технологии в машиностроении. Сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию Победы в Великой Отечественной войне и 85-летию города трудовой доблести Ишимбая. Уфа, 2025. С. 87-90.

16. Ширманова Г.С. Повышение ресурсоэффективности инкубации яиц сельскохозяйственной птицы с применением технологий компьютерного зрения и методов машинного обучения / Г.С. Ширманова, П.П. Молотков, А.В. Молоткова, А.П. Радайкин // В сборнике: Ресурсосберегающие технологии в контроле, управлении качеством и безопасности. Сборник научных трудов XIV Международной конференции студентов, аспирантов, молодых ученых. В 2-х частях. Томск, 2025. С. 318-322.

17. Молотков П.П. Цифровая трансформация в птицеводстве: инновационные методы оценки качества яиц с помощью компьютерного зрения / П.П. Молотков, Г.С. Ширманова, А.В. Молоткова // В сборнике: Цифровая трансформация: взгляд в будущее. Материалы научно-технологической конференции. Санкт-Петербург, 2026. С. 499-503.

18. Ширманова Г.С. Применение методов искусственного интеллекта в птицеводстве: риски и меры информационной безопасности / Г.С. Ширманова, П.П. Молотков, А.В. Молоткова // В книге: Холодильная техника, инженерные системы и биотехнологии. Сборник тезисов VII Национальной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Кемерово, 2026. С. 369-371.

19. Молотков П.П. Интеллектуальные мехатронные системы мониторинга и управления на основе машинного обучения и компьютерного зрения / П.П. Молотков, А.В. Молоткова, Г.С. Ширманова // В книге: Холодильная техника, инженерные системы и биотехнологии. Сборник тезисов VII Национальной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Кемерово, 2026. С. 331-333.

20. Ширманова Г.С. Элементы цифровизации в АПК: обзор методов машинного обучения для неинвазивного контроля инкубации яиц / Г.С. Ширманова, П.П. Молотков, А.В. Молоткова, А.П. Радайкин // В сборнике: Наука и образование. Сборник научных докладов XVIII Международной научной конференции. В 2-х частях. Кемерово, 2026. С. 172-174.

21. Молотков П.П. Адаптивные кибер-физические системы управления микроклиматом в инкубационных комплексах птицеводства / П.П. Молотков, Г.С. Ширманова, А.В. Молоткова // В сборнике: Инновационный конвент "Кузбасс: образование, наука, инновации". сборник тезисов докладов. Кемерово, 2026. С. 157-159.

22. Ширманова Г.С. Цифровой двойник инкубационного цеха: интеграция систем компьютерного зрения и ИИТ-датчиков для управления качеством яйцематериала / Г.С. Ширманова, П.П. Молотков, А.В. Молоткова // В сборнике: Инновационный конвент "Кузбасс: образование, наука, инновации". сборник тезисов докладов. Кемерово, 2026. С. 209-211.

Свидетельства о регистрации прав на ПО:

1. Программа управления работой устройства инкубации яиц сельскохозяйственной птицы /Неверов Е.Н., Руднев П.С., Ширманова Г.С., Владимиров А.А. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024682622, 25.09.2024. Заявка № 2024681903 от 25.09.2024.

Патент на полезную модель

1. Патент на полезную модель № 238376 Устройство для инкубации сельскохозяйственных птиц. заявка: 2025114044, 26.05.2025 Опубликовано: 28.10.2025 Бюл. № 31 / Ширманова Г.С., Неверов Е.Н., Владимиров А.А., Плотников И.Б., Николаева Е.В., Руднев П.С.