

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Кемеровский государственный университет»

На правах рукописи

Ширманова Гузьяль Самигуллаевна

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

4.3.1 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного
комплекса

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор,
Неверов Евгений Николаевич

Кемерово 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	10
1.1 Анализ существующих инкубаторов для инкубации яиц сельскохозяйственных птиц.....	10
1.2 Применение методов машинного обучения и компьютерного зрения в технологии инкубации яиц сельскохозяйственных птиц.....	22
1.3 Применение микроконтроллеров в управлении работой инкубатора для вывода сельскохозяйственной птицы.....	32
1.4 Обзор методов расчёт теплообмена в инкубаторе.....	41
1.5 Заключение по обзору литературы.....	47
Глава 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	50
2.1 Организация выполнения работы.....	50
2.2 Методика определения физических характеристик яиц и категорий куриных яиц.....	52
2.3 Методика определения категорий яиц на основе компьютерного зрения...	53
2.4 Методика расчёта теплообмена в инкубаторе.....	58
2.5 Методика статистической обработки результатов исследований.....	64
Глава 3. РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ МОДУЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЯИЦ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПТИЦЫ ПЕРЕД ИНКУБАЦИЕЙ.....	69
3.1 Разработка системы компьютерного зрения для анализа внешнего вида яиц сельскохозяйственной птицы.....	69
3.2 Результаты и обсуждения работы алгоритма для определения категорий яиц на основе компьютерного зрения	72
Глава 4. РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИНКУБАЦИИ ЯИЦ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПТИЦЫ.....	84
4.1 Расчёт тепловых процессов при разработке энергосберегающего оборудования для инкубации яиц сельскохозяйственной птицы.....	84
4.2 Расчёт теплообмена куриного яйца при конвекции для оптимизации	

режимов работы инкубатора.....	94
4.3 Разработка инкубатора на базе микроконтроллера Arduino для вывода сельскохозяйственной птицы.....	108
Глава 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО ЛАБОРАТОРНОГО ОБРАЗЦА ИНКУБАТОРА И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ВЫВОДА ЯИЦ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПТИЦЫ.....	119
5.1 Алгоритм работы инкубатора на базе микроконтроллера Arduino для вывода сельскохозяйственной птицы.....	119
5.2 Экспериментальная апробация технологии инкубации куриных яиц с применением системы компьютерного зрения и тепловизионного анализа.....	124
5.3 Анализ экономической эффективности внедрения инкубатора на базе микроконтроллера для вывода сельскохозяйственной птицы.....	135
РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	154
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	156
Приложение 1.....	173
Приложение 2.....	178
Приложение 3.....	180
Приложение 4.....	183
Приложение 5.....	184
Приложение 6.....	186

ВВЕДЕНИЕ

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 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: 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, включая 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 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 использованных источников 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 страниц.

Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В литературном обзоре представлен анализ современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему. Рассмотрен анализ существующих способов, технологии и технических средств инкубации и современных технических решений бытовых инкубаторов, их сравнительной оценки и обоснование перспектив дальнейшей разработки инновационных систем.

1.1 Анализ существующих инкубаторов для инкубации яиц сельскохозяйственных птиц

Современное птицеводство требует создания инкубаторов, максимально приближенных к естественным условиям насиживания, что является важным условием для успешного эмбрионального развития яиц и высокого коэффициента вывода птенцов. В бытовых инкубаторах, используемых в малых хозяйствах и домашних условиях, крайне важно обеспечить точное управление температурным режимом, влажностью и равномерностью распределения воздушного потока. Это достигается за счёт интеграции различных функциональных модулей, таких как системы обогрева, охлаждения, увлажнения, автоматического переворота яиц и цифровых контроллеров с резервированием питания.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью модернизации традиционных конструкций и внедрения инновационных технологий (например, технологии зонального нагрева и применения плёночных электронагревателей), способных улучшить стабильность микроклимата в камере инкубатора, снизить энергозатраты и повысить качество вывода молодняка. Цель данной главы состоит в комплексном анализе современных технических решений бытовых инкубаторов, их сравнительной оценке и обосновании перспектив дальнейшей разработки инновационных систем.

Обзор научной литературы показал, что инкубация яиц имеет древние корни

и свидетельствует о высоком уровне практического знания термодинамики и биологии у ранних цивилизаций. Наиболее ранние достоверные сведения об инкубации относятся к Древнему Египту. Археологические и письменные источники указывают на использование двухэтажных глиняных сооружений, где нижний уровень служил источником тепла, а на верхнем размещались яйца [9, 35].

Тепло распространялось по специальным каналам — так называемым отдушинам, - обеспечивая равномерный прогрев инкубационной камеры. Вентиляция осуществлялась через отверстия в стенах. Для контроля температуры применялся эмпирический метод: жрецы наблюдали за плавлением смеси животного сала и растительного масла, которая начинала таять при 37–40 °С - диапазоне, близком к оптимальной температуре инкубации куриных яиц [9].

Аналогичные, но конструктивно иные решения использовались в Древнем Китае. Здесь для обогрева яиц применялись глиняные печи, встроенные в стены жилищ. Корзины с яйцами размещались на поверхности печи, а слой утрамбованной земли вокруг обеспечивал дополнительную теплоизоляцию и аккумуляцию тепла. Такой подход демонстрирует глубокое понимание теплопередачи и адаптацию технологий под локальные климатические и материальные условия [36].

Первое известное техническое устройство, идентифицируемое как инкубатор в современном понимании, было создано в XVII веке итальянским изобретателем Джованни Порто. Его конструкция использовала тепло от масляных ламп для поддержания температуры. Однако изобретение не получило распространения: церковные власти расценили его как колдовство, и автор был вынужден прекратить работу; устройство было уничтожено [21].

Массовое применение инкубаторов началось лишь в конце XIX века, когда в США и странах Западной Европы появились первые электрические модели [36]. В СССР промышленное производство инкубаторов стартовало в 1928 году. К этому периоду относится выпуск таких моделей, как «Спартак» и «Птицеводсоюз» - секционные устройства, позволявшие гибко масштабировать вместимость от нескольких сотен до десятков тысяч яиц [19, 37]. Особое внимание уделялось

разработке систем терморегуляции и механизации переворота яиц. Уже к 1935 году инкубаторный парк СССР достиг мощности в 42 млн. яиц одновременной закладки, что стало возможным благодаря созданию шкафных электрифицированных инкубаторов с принудительной вентиляцией [19].

Таким образом, эволюция инкубационных технологий прошла путь от эмпирических систем на основе биомассы и солнечного тепла - к высокоточным автоматизированным устройствам, способным поддерживать микроклимат с точностью до $0,1^{\circ}\text{C}$. Эта трансформация была обусловлена как развитием материаловедения и теплофизики, так и углублением знаний в области эмбриологии птиц

Современные инкубаторы классифицируются по назначению, технической реализации и эксплуатационным параметрам [3, 9, 32, 35]:

1. По назначению выделяют инкубаторы:

- домашние (бытовые) - рассчитаны на закладку до 100 яиц, используются в личных подсобных хозяйствах [9].

- фермерские - предназначены для вывода 100–500 яиц и применяются в мелких и средних птицеводческих хозяйствах с коммерческой направленностью [35].

- промышленные - устанавливаются на птицефабриках, имеют закладочную мощность от нескольких тысяч до десятков тысяч яиц.

2. По функциональному назначению инкубаторы подразделяются на [3,8]:

- предварительные - обеспечивают условия для первых 18 суток инкубации куриных яиц, когда наиболее критична стабильность температуры и влажности.

- выводные - используются на завершающем этапе (с 18-го по 21-й день), когда основное внимание уделяется вентиляции и поддержанию повышенной влажности.

- универсальные - совмещают обе функции, что особенно удобно при работе с небольшими партиями яиц.

3. По способу переворота яиц выделяют инкубаторы с

- ручным переворотом - оператор вручную поворачивает яйца 3–5 раз в сутки, что характерно для самых простых и недорогих моделей,

- механическим переворотом - осуществляется с помощью рычажных или кулачковых механизмов, приводимых в действие вручную или простым электроприводом,

- автоматическим переворотом - реализуется с помощью шаговых двигателей или сервоприводов, программно-управляемых микроконтроллером с интервалом от 1 до 9 часов [19,32].

4. По типу инкубируемых яиц выделяют бытовые инкубаторы, адаптированные под различные виды птицы: куриные, перепелиные, утиные, гусиные, индюшиные. Размер и форма лотков, а также параметры микроклимата (температура, влажность, длительность инкубации) варьируются в зависимости от биологических особенностей вида [3].

Независимо от типа, все инкубаторы включают: корпус с термоизоляцией, систему нагрева, увлажняющее устройство, вентиляцию, механизм переворота, блок управления [28]. Рассмотрим подробнее эти элементы.

Термоизолированный корпус - обеспечивает стабильность микроклимата и минимизирует теплопотери. Выбор материала корпуса существенно влияет на стабильность микроклимата внутри инкубатора. В отечественной практике выделяют несколько вариантов [4]:

- ОСП-панели, дешёвые и простые в обработке, однако подвержены деформациям и выделяют токсичные вещества при воздействии высокой влажности;

- ламинированная фанера представляет собой более достойное решение при условии обработки антисептиками, но требует периодической реставрации внутреннего покрытия;

- экструдированный пенополистирол имеет низкую теплопроводность и устойчивость к влаге, но применим как изоляционный слой в составе многослойных конструкций;

- сэндвич-панели ПВХ с пенополиуретановым наполнителем, это оптимальное решение, обладающее самым низким коэффициентом теплопроводности, высокой устойчивостью к влаге и простотой дезинфекции.

Наиболее эффективными материалами считаются сэндвич-панели с пенополиуретановым наполнителем, обладающие низким коэффициентом теплопроводности ($\lambda \approx 0,022 \text{ Вт/(м·К)}$) и устойчивостью к влаге (рисунок 1.1) [4].

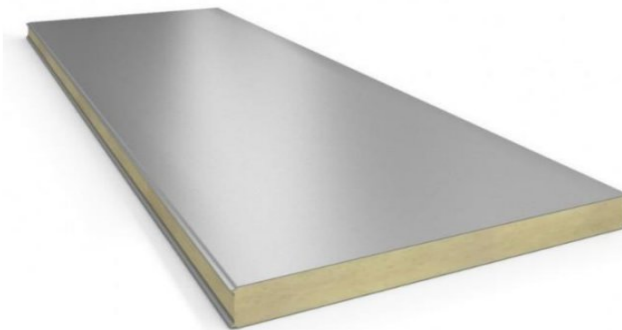


Рисунок 1.1 - Сэндвич-панели с пенополиуретановым наполнителем

Система нагрева реализуется с помощью ТЭНов, греющих кабелей или плёночных нагревательных элементов. Более современным решением является технология зонального нагрева, при которой верхняя часть яйца подвергается более интенсивному нагреву за счёт контакта с нагревательной мембраной.

В целях моделирования условий естественной инкубации [21] перспективным решением представляются плёночные электронагреватели. Конструктивная особенность данных устройств — тонкий фольгированный слой — обеспечивает равномерное распределение тепловой энергии. Экспериментально подтверждено, что применение таких нагревателей позволяет уменьшить время восстановления температурного режима на 6 минут (с 9 до 3 мин), повысить уровень пожаробезопасности, добиться существенной экономии энергоресурсов [24, 28].

Система увлажнения и вентиляции включает гидролотки, ультразвуковые испарители или форсуночные распылители. Уровень относительной влажности должен поддерживаться в диапазоне 40–85 % в зависимости от стадии инкубации. Вентиляция может быть естественной или принудительной [39].

Механизм переворота яиц исключает прилипание зародыша к внутренней оболочке скорлупы и способствует равномерному прогреву. Угол поворота обычно составляет 45° в каждую сторону [8, 33].

Система управления предполагает использование современных систем управления процессом инкубации за счет использования цифровых датчиков температуры (точность $\pm 0,1^\circ\text{C}$) и влажности ($\pm 1-3\%$), возможностью задания программ и резервного питания от аккумулятора [29, 65].

Цифровые контроллеры, объединяющие функции управления температурой, влажностью и автоматического переворота яиц, позволяют обеспечить высокий уровень автоматизации [70]. Эти системы могут работать с возможностью дистанционного мониторинга (с использованием IoT) и автоматического переключения между основным и резервным питанием, что исключает негативное влияние перебоев в электроснабжении [51-52, 66, 83, 105].

Так, в отечественных инкубаторах ИУП-Ф-45М/ИУВ-Ф-15М, выпускаемых ОАО «Пятигорсксельмаш», автоматическая стабилизация температуры и влажности воздуха в камере, используется микропроцессорный блок с функциями сигнализации и индикации, которые в совокупности представляют собой систему управления режимами инкубации (рисунок 1.2) [17].



Рисунок 1.2 - Система контроля и автоматизации

ЗАО «Востокптицемаш» реализован программно-аппаратный комплекс на базе универсального контроллера климата (СКИП УКК) (рисунок 1.3), позволяющий управлять режимами без участия высококвалифицированного персонала [19].



Рисунок 1.3 - Универсальный контроллер климата СКИП УКК

Патент RU185271U1 (патент RU185271U1 «Инкубатор», МПК:А01К41/00, опубл.29.11.2018) описывает трёхкомпонентную конструкцию: электронный блок управления, корпус с механизмом переворота и поддон с ультразвуковым увлажнителем. Переворот осуществляется шаговым двигателем через зубчатую передачу, что обеспечивает плавное вращение яиц и способствует нормальному развитию эмбриона [27]. Это усовершенствованный вариант инкубационного оборудования, предназначенного для эффективного разведения сельскохозяйственной птицы (рисунок 1.4).

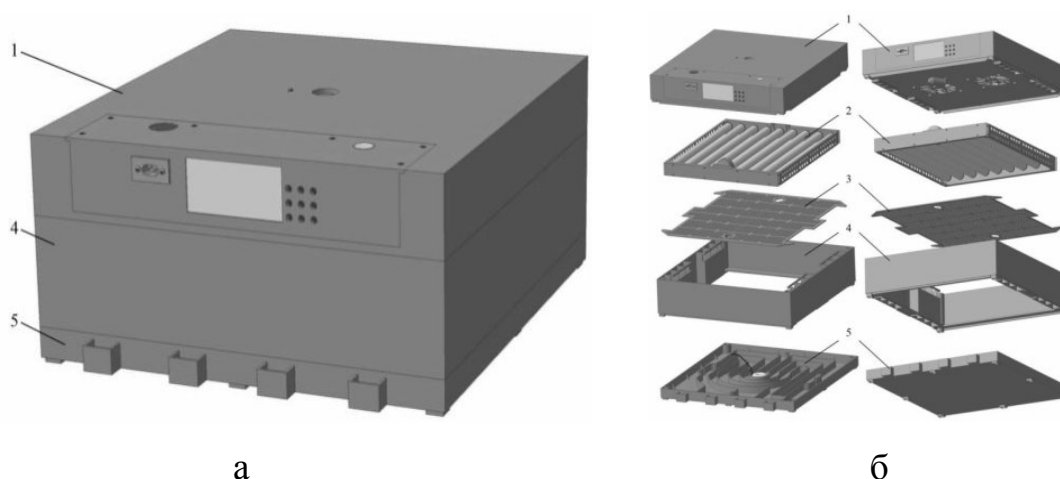


Рисунок 1.4 – Трёхмерная модель инкубатора: а - общий вид инкубатора в сборе (изометрия); б - основные элементы инкубатора в разнесённом виде

Нами проведен сравнительный анализ технические характеристики существующих на российских рынках инкубаторов (таблица 1.1) [6, 11, 12, 18, 23, 30].

Таблица 1.1 - Сравнение технико-экономических характеристик инкубаторов

Показатель	Марка						
	ТГБ-70	«Норма Лупер 72»	«Несушка»	Спектр-84	SITITEK™ 12	Мульти инкубатор "ВЕСНА"	«Матрица Дели» с алюминиевым лотком
Количество яиц, шт.	70	72	77	84	12	77	86
Напряжение питания, В	220/12	220/12	220/12	220/12	220	220/12	220/12
Установленная мощность электронагревателей, Вт	80	60	65	80	40	65	60
Рабочая температура, °С	36-39,9	35-40	30-45	30-39,5	30-39,5	35-40	35-40
Точность поддержания установленной температуры, °С	±0,2	±0,1	±0,2	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1
Диапазон устанавливаемой влажности, %	40-85	35-80	45-80	50-70%	45-60	30-85	35-85
Точность поддержания установленной влажности, %	—	±3	±3	±5	-	±1	±3
Воздухообмен	Естественный	Принудительный	Естественный	Принудительный	Принудительный	Принудительный	Принудительный
Материал корпуса	Чехол из ткани	Пластиковая сэндвич- панель	Пенопласт	Поликарбонат	ПВХ	ПВХ сэндвич- панели	Пенопласт
Поворот яиц	Авто	Авто	Авто	Авто	Авто	Авто	Авто
Режим поворота яиц	8 раз в сутки	каждые 2 часа	каждые 2 часа	каждые 2 часа	регулируется в диапазоне от 2 до 9 часов	интервал от 1 до 8 часов	каждые 2 часа

Разновидности инкубаторов представлены на рисунке 1.5.



а) Бытовой инкубатор марки
«Норма Лупер»



б) Бытовой инкубатор марки
«ВЕСНА»



в) Бытовой инкубатор
«Несушка», ООО «ЗЭБТ»



г) Инкубатор Матрица Дели с
алюминиевым лотком



д) Бытовой инкубатор марки ТГБ-70

Рисунок 1.5 – Разновидности бытовых инкубаторов

Анализ технических характеристик инкубаторов показал, что большинство моделей (кроме «Несушки» и ТГБ-70) обеспечивают высокую точность поддержания температуры с отклонением не более $\pm 0,1$ С, что соответствует стандартам качественной инкубации.

Лучшие теплоизоляционные и эксплуатационные свойства демонстрируют модели с сэндвич-панелями («Норма Лупер 72», «ВЕСНА»). Наиболее уязвимыми к внешним условиям являются инкубаторы из пенополистирола («Несушка», «Матрица Дели») и текстильного чехла (ТГБ-70), которые требуют дополнительных мер по защите от влаги и механических повреждений.

Мультиинкубатор «ВЕСНА» является наиболее технологичным решением: он оснащён автоматической системой долива воды, стеклопакетной крышкой, трёхуровневым уплотнением и гибким управлением режимами. Однако его цена (31 500 руб.) значительно превышает стоимость других моделей. Более сбалансированным по «цена/качество» является «Спектр-84» (7 850 руб.), сочетающий высокую вместимость, принудительную вентиляцию и продуманную конструкцию воздушных потоков.

В результате рассмотренных моделей инкубаторов мы можем сказать, что за последние годы были разработаны новые технологии и улучшения конструкций инкубаторов, направленные на повышение качества и производительности процессов инкубации.

В настоящее время в птицеводстве используются различные температурные режимы инкубации: одностадийный, многостадийный и термоконтрастный [7]. Каждый из них имеет свои технологические особенности и целевое назначение, обусловленное биологическими потребностями эмбрионов на различных стадиях развития.

Одностадийный режим предполагает одновременную закладку партии яиц и последовательную корректировку параметров микроклимата в соответствии с фазами эмбриогенеза. Наиболее распространённой практикой

является снижение температуры в инкубационной камере на завершающем этапе инкубации (с 18-го по 21-й день у кур), что соответствует естественным физиологическим изменениям в организме развивающегося зародыша. Производители инкубационных яиц мясных пород птицы, как правило, рекомендуют именно этот режим, поскольку он позволяет обеспечить максимальную выводимость при условии соблюдения заданных параметров [5].

Рекомендуемые производителями инкубационных яиц температурные режимы могут различаться, однако наблюдается устойчивая тенденция к постепенному снижению температуры в инкубационной камере по мере продвижения эмбрионального развития. Производители инкубационного оборудования, в свою очередь, реализуют собственные подходы к организации одноэтапной инкубации. Установлено, что на эффективность процесса инкубации оказывают влияние не только заданные параметры термостатирования, но и конструктивные особенности инкубатора (в частности, его объём и аэродинамическая схема), а также морфологические характеристики инкубируемых яиц, включая массу, форму и толщину скорлупы [9].

В бытовых инкубаторах, не оснащённых функцией программирования температурного профиля, регулировка осуществляется вручную в соответствии с рекомендациями производителя устройства. Например, в инструкциях к отечественным моделям, таким как «Норма» и «Несушка», указывается поддержание температуры на уровне 37,8–38,0 °C в течение основного периода инкубации с последующим снижением на 0,5 °C при начале массового вывода [13, 18].

Инкубаторы с расширенным функционалом (например, «Золушка») предусматривают более гибкий диапазон регулировки — от 38,3 до 38,7 °C, — с акцентом на необходимость предотвращения превышения порога в 39 °C. При этом учитывается, что на поздних стадиях инкубации яйца сами выделяют значительное количество тепла, что может привести к локальному перегреву.

В таких случаях требуется ручная коррекция режима на основе данных термометра [16].

Большинство зарубежных инкубаторов оснащены микроконтроллерами и реализуют автоматизированные программы, учитывающие не только стадию развития эмбриона, но и физиологические особенности вида птицы [20]. Так, в устройствах Brinsea (Великобритания) [14] поддерживается постоянная температура 37,4–37,6 °С на протяжении всего цикла, что обосновано высокой термостойкостью эмбрионов к кратковременным колебаниям. Инкубаторы Rcom (Южная Корея) используют двухуровневый профиль: 37,5 °С - на ранних и средних стадиях, 37,0 °С - за 72 часа до ожидаемого вывода [15].

При многостадийном режиме не происходит изменения температуры в процессе инкубации. Преимущества этого метода характеризуется постоянством микроклимата и предполагает непрерывную закладку свежих яиц в камеру, уже содержащую яйца на поздних стадиях инкубации. В таких системах поддерживается средняя температура (обычно 37,8 °С), а распределение тепловых зон в камере осуществляется за счёт конструктивных особенностей, например, размещения лотков с яйцами разного возраста в зонах с различной температурой. Этот метод широко применяется в мелких и средних хозяйствах, где отсутствует возможность формирования крупных однородных партий.

Согласно результатам исследований [25], применение термоконтрастного режима активизирует газообмен в яйце, улучшает кровообращение эмбриона и в итоге повышает жизнеспособность выведенного молодняка. В связи с этим для достижения высоких показателей выводимости и улучшения качества получаемых цыплят необходимо разрабатывать инкубаторы с функцией программирования сложных температурных профилей. Особое значение имеет внедрение термоконтрастных циклов, позволяющих моделировать естественные условия развития эмбрионов.

1.2 Применение методов машинного обучения и компьютерного зрения в технологии инкубации яиц сельскохозяйственных птиц

Методы компьютерного зрения становятся стандартом диагностики патологий эмбрионального развития в процессе инкубации яиц сельскохозяйственной птицы. Их главное преимущество — неинвазивность, исключая механическое воздействие на яйцо и обеспечивающая сохранность эмбриона. Точность распознавания дефектов достигается за счёт специализированных оптических сенсоров: цифровых ПЗС-камер, инфракрасных и тепловизионных систем. Для повышения достоверности классификации изображений в таких системах применяются архитектуры свёрточных нейронных сетей, демонстрирующие устойчивую эффективность при решении задач распознавания биологических объектов.

В работе авторами [59] с опорой на статью [109] разработана система контроля оплодотворенности/неоплодотворенности куриных яиц, которая включает в себя методы обработки изображений и глубокого обучения. В исследовании с помощью камеры, помещенной в инкубатор, были получены изображения яиц, а затем был осуществлен процесс сегментации. Были созданы две базы данных фотографических изображений куриных яиц, и были проведены процессы сегментации и обнаружения оплодотворенных яиц с использованием подхода на основе модели глубокого обучения для компьютерного зрения (Mask R-CNN). На рисунке 1.6 представлены примеры изображений этапа тестирования, примененные к обеим базам данных изображений. Для оценки эффективности сегментации использовались метрики измерения пересечение по объединению (IoU) и метрика измерения точности объектов (AP). Из приведенного исследования видно, что значения измерения точности объектов (AP) выше, когда выбран режим измерения пересечение по объединению $\text{IoU} = 0,7$. Согласно результатам испытаний процесса сегментации и обнаружения оплодотворенных яиц, которые

использовались к обеим базам данных изображений, оплодотворенные яйца были обнаружены к концу третьего дня.

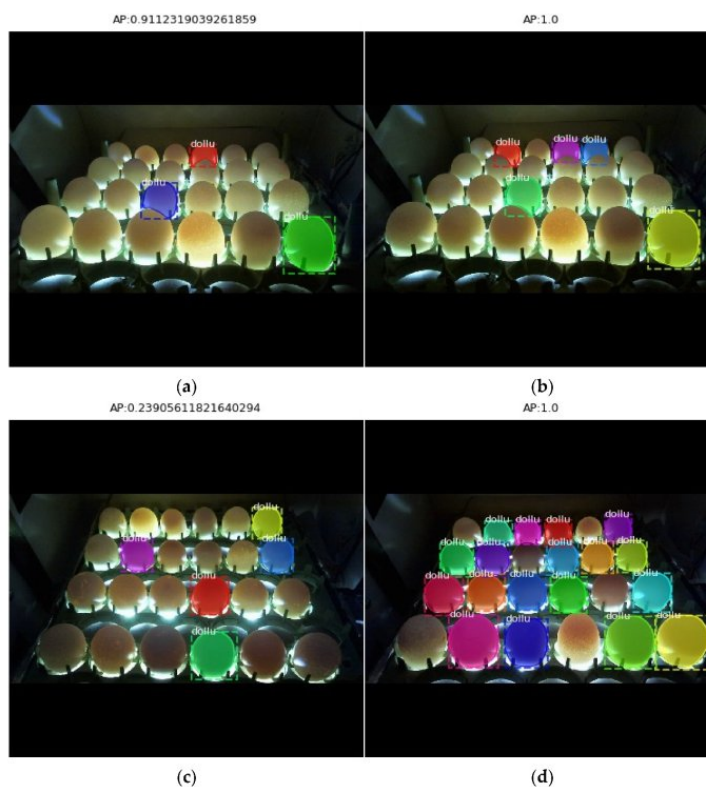


Рисунок 1.6 - Изображения, полученные в результате процесса тестирования (а, b) первый набор данных - (с, d) второй набор данных)

В рамках проекта [83] на основе статьи [126] были обработаны инфракрасные изображения яиц для расчета объема воздушной камеры и скорости охлаждения, а также были проведены ежедневные измерения веса яиц и температуры окружающей среды. Искусственные нейронные сети (ИНС) были «обучены» использованию множества входных параметров для распознавания закономерностей в данных. ИК-камера, подключенная к ПК, делает снимок каждую секунду в течение 5 минут, в общей сложности за один просмотр делается 300 снимков. Программное обеспечение Winters II сохраняет ИК-изображения в формате TIFF, представляющие температурный диапазон с цветовой гаммой (рисунок 1.7).

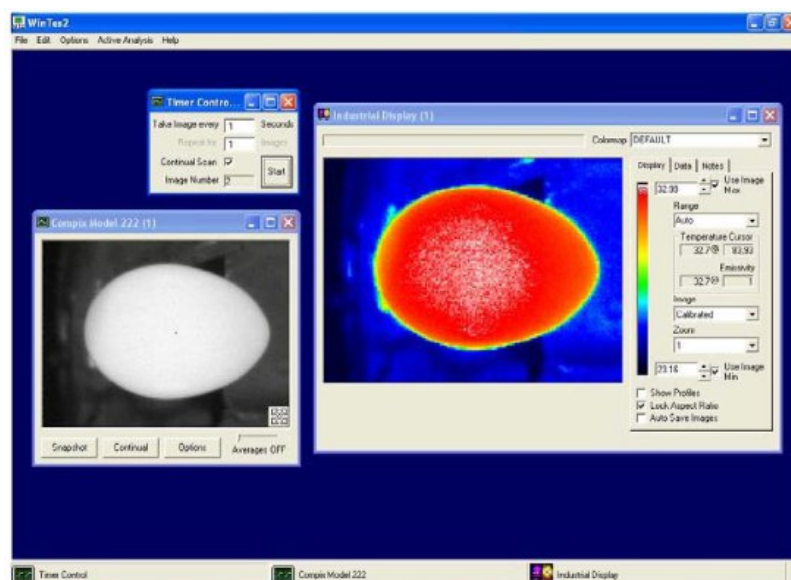


Рисунок 1.7 - Дисплей программного обеспечения Winter II

Цвет каждого пикселя соответствует температуре и эти реальные значения температуры могут быть извлечены в текстовый файл с помощью программы Winter Multi-file. Все остальные данные — дата и время, температура окружающей среды, температура в камере, влажность в инкубаторе, вес яиц и замечания по наблюдениям — заносятся в электронную таблицу Excel. Оптические изображения, получаемые каждый день, полезны для определения интересующих областей на соответствующих ИК-изображениях, таких как скорость охлаждения воздушной камеры или средняя температура в центре яйца.

В исследовании [61] описывается метод замены ручной проверки гнездовых ящиков системой машинного зрения, которая автоматически предупреждает менеджеров о приближении вылупления птенцов. Чтобы протестировать этот метод, были сделаны тепловизионные снимки яиц ($n=42$) 15 видов пситациформных (попугаев) и гусеобразных (уток) в специализированном птицеводческом комплексе. Морфология 9-дневных инкубационных яиц представлена на рисунке 1.8. Модель машинного обучения, разработанная в Google Vertex AI, позволяет обнаруживать яйца в течение 1,5 дней после развития зародыша цыпленка со 100% точностью, без ложных срабатываний. Этот метод обладает большим потенциалом для

улучшения результатов разведения в неволе или мониторинга диких гнездовых ящиков для редких, находящихся под угрозой исчезновения видов птиц.

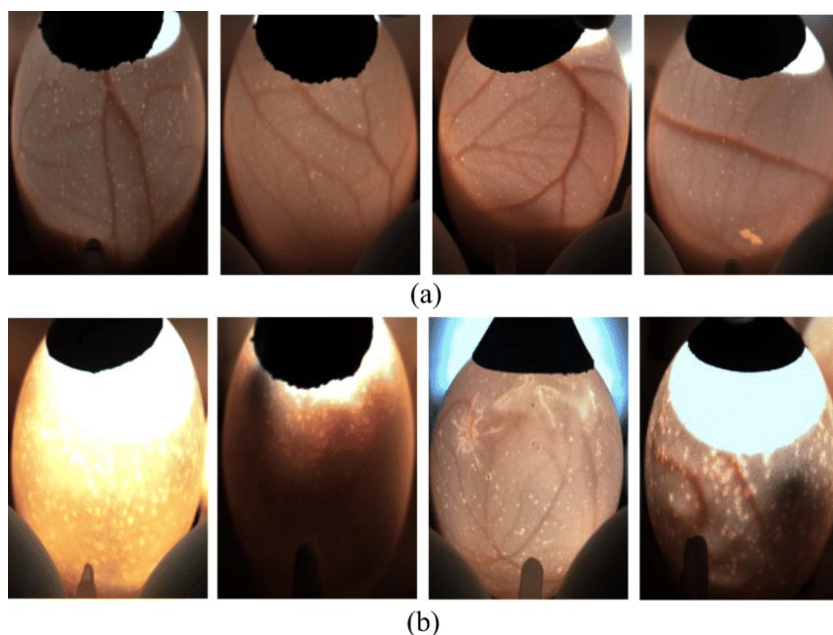


Рисунок 1.8 - Морфология 9-дневных инкубационных яиц: (а - оплодотворенные яйца, б - мертвые яйца)

Сверточные нейронные сети (CNN), структура которых представлена на рисунке 1.9, демонстрирующие самые современные возможности в решении различных визуальных задач, были использованы в работе [73, 79]. Ожидается, что CNN может быть применен для классификации инкубационных яиц 9-дневков. Инкубационные яйца делятся на оплодотворенные и неоплодотворенные. Из-за межклассового сходства и внутриклассовых различий в наборах данных о инкубационных яйцах за 9 дней для повышения точности классификации предлагается метод классификации CNN, сочетающий взвешивание каналов (модуль сжатия и возбуждения) и совместное наблюдение.

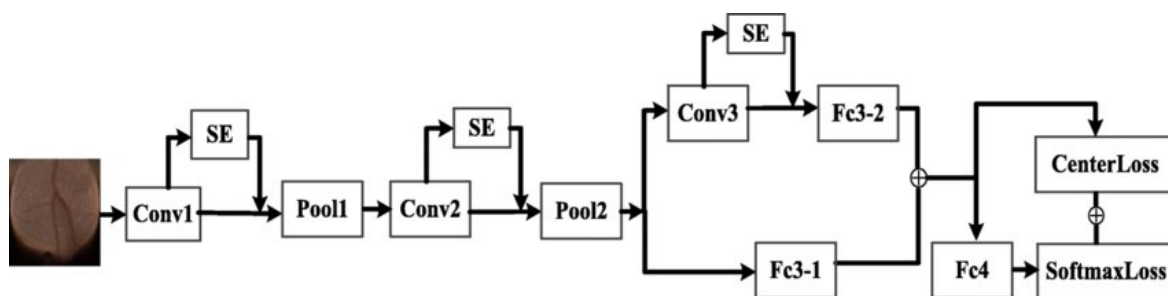


Рисунок 1.9 - Сетевая структура SJ-CNN

Авторы используют центральные потери и потери softmax вместе в качестве сигнала совместного наблюдения. При таком совместном наблюдении CNN может получать глубокие характеристики с межклассовой дисперсией и компактностью внутри класса, что повышает способность к распознаванию и обобщению. Одновременно с этим при выделении признаков используется взвешивание каналов, которое добавляется в каждый сверточный слой для лучшего использования признаков каналов. Результаты экспериментов показывают, что предложенный метод успешно решает проблему классификации инкубационных яиц. Точность метода составляет 98,8%.

Чтобы достичь цели более точного и эффективного определения жизнеспособности инкубационных яиц, которые делятся на оплодотворенные и неоплодотворенные, в статье [72], исходя из данных статей [112, 124] предложен гибридный подход, объединяющий фотоплетизмографию (PPG) и свёрточные нейронные сети (CNN) для регистрации и анализа сердечной активности развивающихся эмбрионов. На девятые сутки инкубации PPG позволяет регистрировать микроскопические изменения объёма крови в тканях эмбриона, что служит надёжным биомаркером жизнеспособности. Авторы разработали две архитектуры CNN: E-CNN, ориентированную на обработку временных последовательностей сердечных сигналов, и SR-CNN, предназначенную для анализа визуализированных сигналов. Вторая модель включает специализированный модуль SE-Res, сочетающий механизмы

внимания (squeeze-and-excitation) и остаточное обучение, что позволило достичь точности классификации 99,62 % на тестовой выборке.

Жизнеспособность является важной характеристикой в птицеводстве, поэтому любое снижение доли оплодотворённых яиц приводит к огромным экономическим потерям из-за увеличения затрат на инкубацию. В исследовании [74] диэлектрическая проницаемость и коэффициент потерь яиц были использованы в качестве неразрушающего, дешевого и точного метода идентификации погибших эмбрионов и неоплодотворенных яиц во время инкубации. Для этой цели были использованы классификаторы искусственной нейронной сети (ANN- Artificial Neural Network) и метода опорных векторов (SVM - Support Vector Machine). При использовании классификатора метода опорных векторов (SVM) точность достигала 100 % на 18-е сутки и 92,31 % уже на 5-е сутки, что превосходило показатели классических ANN. Подобные системы отличаются технологической простотой и потенциальной применимостью к яйцам различных видов птиц.

Ещё одно направление связано с гиперспектральной визуализацией в ближнем инфракрасном (NIR - Near-Infrared Spectroscopy) диапазоне. Исследование, описанное в работе [92], продемонстрировало возможность ранней диагностики оплодотворённости на основе анализа спектральных и текстурных признаков. На выборке из 174 куриных яиц (156 оплодотворённых и 18 бесплодных) применялись фильтры Габора для извлечения текстурных характеристик области интереса. Снижение размерности признакового пространства осуществлялось с помощью метода главных компонент, после чего применялась кластеризация K-means. Наилучшие результаты классификации были получены на нулевой день инкубации (100 %) и на четвёртые сутки (84,1 %). Особенно важно, что уже до начала инкубации возможна достаточно точная классификация оплодотворенных и неоплодотворенных яиц до начала инкубации на основе спектральных признаков высокой чувствительности, что открывает перспективы для разработки систем прединкубационного скрининга.

Одним из важных факторов повышения производительности инкубационной отрасли является обеспечение выводимости яиц, помещаемых в инкубаторы. В рамках исследования [77] с опорой на опыт авторов статей [89, 91, 103] была разработана и оценена система машинного зрения, позволяющая определить оплодотворенность или неоплодотворенность яиц. Дополнительно, в исследованиях, посвящённых дефектам яиц, подчёркивается значение цветовой компьютерной визуализации. В работе [103] показано, что использование RGB-гистограмм в сочетании с нейросетями позволяет выявлять кровяные включения, трещины и загрязнения скорлупы с точностью до 92,8 %. Авторы подчёркивают, что включение в обучающую выборку образцов с различными типами дефектов и из разных источников повышает робастность моделей.

Ряд работ расширяет спектр диагностических признаков. Так, в исследовании [91] предложено использовать инфракрасную термографию для оценки тепловых аномалий, возникающих при неравномерном развитии эмбриона. Авторы применили метод главных компонент (PCA) для снижения размерности температурных карт и последующую классификацию с использованием многослойного персептрона (MLP). Система смогла дифференцировать оплодотворенные и неоплодотворенные яйца с точностью до 94 % на 7-е сутки.

В работе [89] рассмотрено применение акустической эмиссии: при лёгком механическом воздействии оплодотворенные и неоплодотворенные яйца демонстрируют различия в резонансных характеристиках оболочки. Обработка звуковых сигналов ИНС позволила достичь точности 89,5 % при классификации на 10-е сутки инкубации. Метод особенно чувствителен к внутренним изменениям вязкоупругих свойств содержимого яйца, связанным с развитием эмбриона

Наконец, в [92] исследовано влияние микроструктуры скорлупы, оцениваемой с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM) и обработки изображений. Показано, что пористость и толщина скорлупы

статистически значимо различаются у оплодотворенных и неоплодотворенных яиц, что может служить дополнительным предиктором в многофакторных моделях.

В современном биотехнологическом производстве, где для культивирования специфических патогенов используются куриные эмбрионы, критически важным этапом является своевременное определение их оплодотворенности и жизнеспособности. Технологический процесс требует дифференциации эмбрионов по трём состояниям: жизнеспособному, погибшему и ослабленному с последующей их отдельной обработкой. На практике данная задача решается преимущественно вручную, что сопровождается значительными трудозатратами и неизбежным влиянием человеческого фактора. В условиях высокой загрузки персонала, особенно при длительной работе, возрастает риск ошибочной классификации, причём наибольшую сложность представляет выявление ослабленных эмбрионов, которые чаще всего оказываются нераспознанными. Подобные ошибки приводят к неоправданным экономическим потерям, связанным с использованием некондиционного биоматериала и нарушением технологических регламентов. В статье [125] представлен метод, основанный на фотоплетизмографии и сверточной нейронной сети (CNN - convolutional neural network), позволяющий автоматически, быстро и точно определять оплодотворенность куриного эмбриона, а также впервые предлагается обнаружение слабого эмбриона. Установлено, что различные состояния эмбрионов характеризуются специфическими визуальными признаками: для жизнеспособных эмбрионов характерно наличие множества радиально расходящихся кровеносных сосудов, у ослабленных эмбрионов сосуды немногочисленны, истончены и фрагментированы, погибшие эмбрионы не содержат сосудистого рисунка, а инфицированные отличаются наличием тёмных включений. Помимо морфологических различий, выявлены закономерности теплового поведения: при извлечении из инкубатора с температурой 37,8 °C в среду с температурой 25 °C скорость остывания

возрастает в ряду: жизнеспособный → ослабленный → инфицированный → погибший эмбрион. Также установлено, что оптическая плотность (снижение пропускания света) жизнеспособных эмбрионов увеличивается по мере развития, тогда как для остальных типов этот показатель изменяется незначительно. В эксперименте 5000 выборок использовались в качестве обучающего набора и 1000 выборок в качестве тестового набора. После предварительной обработки данные вводятся в независимо разработанную сверточную модель нейронной сети для получения результатов классификации. Точность классификации куриных эмбрионов достигла 97,3 процента, в том числе 100-процентных живых эмбрионов – 98,33% мертвых эмбрионов и 92,67% слабых. Результаты эксперимента показывают, что метод определения оплодотворенности и жизнеспособности куриных эмбрионов, основанный на PPG и сверточной нейронной сети, имеет высокую прикладную ценность в процессе производства вакцин.

В птицеводстве используются многие доступные технологии с точки зрения автоматизации фермерских хозяйств и санитарного контроля. Однако не хватает надежных методов и доступного оборудования для обнаружения птичьих эмбрионов и разделения по половому признаку на ранних стадиях. В работе [99] стремились оценить потенциальное использование тепловизионных микрокамер для обнаружения эмбрионов в перепелиных яйцах с помощью тепловизионных изображений в течение первых 168 часов (7 дней) инкубации. Авторы модифицировали архитектуру YOLOv5s - одну из самых лёгких и быстрых версий YOLO - для работы с низкокачественными тепловыми изображениями. Модель была обучена не просто классифицировать яйцо как «фертильное/нефертильное», а локализовать область повышенной температуры, что повысило интерпретируемость и надёжность. Модель на основе YOLOv5s продемонстрировала следующие метрики на 2-е сутки инкубации: точность 94,2 %, полнота 91,8 %, F1-мера 93,0 %, средняя точность (mAP@0.5) 92,5 %. Чувствительность системы к

выявлению фертильных яиц увеличивалась с прогрессированием инкубации на четвертые сутки до 98,7%.

Неоплодотворенные утиные яйца и рано погибшие эмбрионы могут нанести значительный вред нормально развивающимся яйцам, если их своевременно не обнаружить и не удалить. Чтобы решить эту проблему, в исследовании [90] основное внимание уделяется утиным яйцам, инкубируемым в течение 10 дней. Представленное устройство разработано с учетом процесса инкубации и может быть быстро внедрено в реальное производство. Идентификация неоплодотворенных утиных яиц и яиц с рано погибшими эмбрионами основана на сети YOLOv7. Алгоритм включает в себя использование MobileOne в качестве замены магистральной сети YOLOv7 и упрощенные операции, применяемые к головке YOLO. Экспериментальные результаты показали, что MobileOne-YOLO обеспечивает точность обнаружения 98,10% и воспроизведения 98,55%. Преимущество применения сети MobileOne-YOLO обусловлено повышением скорости обнаружения. Данное исследование стало основой для последующей разработки интеллектуального оборудования для обнаружения неоплодотворенных утиных яиц и рано умерших эмбрионов.

Раннее определение фертильности инкубационных яиц является важной задачей для современной инкубационной промышленности. Неблагоприятные или содержащие мёртвые эмбрионы яйца не только снижают выход молодняка, но и создают риски биобезопасности и загрязнения соседних яиц. Традиционные методы, такие как просвечивание (овоскопия), либо субъективны, либо требуют значительных временных затрат. В этой связи авторы работы [67] предложили неразрушающий, автоматизированный метод, сочетающий гиперспектральную визуализацию и глубокие свёрточные нейронные сети для ранней (до 5-х суток) и точной диагностики фертильности куриных инкубационных яиц. Авторы продемонстрировали, что сочетание гиперспектральной визуализации и глубокого обучения обеспечивает высокую точность (до 98,8 % к 5-м суткам), раннюю диагностику (более

85 % на 1-е сутки, >95 % — на 3-и) и полностью неразрушающий характер оценки.

1.3 Применение микроконтроллеров в управлении работой инкубатора для вывода сельскохозяйственной птицы

Развитие сельского хозяйства и обеспечение продовольственной безопасности являются одними из важнейших задач современного общества. Удовлетворение высокого спроса на продукцию птицеводства требует использования инкубаторов для вывода сельскохозяйственной птицы. Современные бытовые и фермерские инкубаторы для сельскохозяйственной птицы всё чаще оснащаются цифровыми системами управления, основанными на микроконтроллерах. Такой подход обеспечивает высокую точность поддержания микроклимата и минимизирует зависимость от квалификации оператора, что особенно важно в условиях мелкосерийного птицеводства.

Диапазон температур, влажность и скорость потока воздуха в инкубаторе являются связанными факторами. Если внутренняя температура инкубатора для птиц контролируется, то и относительная влажность также контролируется. В настоящее время все чаще для управления работой инкубатора используют различные микроконтроллеры, применяемые в робототехнике.

Общей проблемой в данной области является определение нормальных условий для инкубации яиц. Смерть эмбриона может наступить на каждой стадии его развития, и диагностика причин смерти эмбриона и её предотвращение являются задачами, решаемыми в ходе разработки новых конструкций инкубаторов.

В условиях ограниченного доступа к зарубежным моделям инкубаторов возникла необходимость в разработке и внедрении большего количества отечественных аналогов.

В работе [88] спроектирован и изготовлен недорогой автоматизированный инкубатор на базе микроконтроллера Arduino Uno R3, ориентированный в первую очередь на инкубацию яиц перепёлок. Выводимость перепёлок достигла 94% при потребляемой мощности - 510 Вт.

Статья [102] посвящена разработке низкозатратного автоматизированного инкубатора на базе микроконтроллера, ориентированного для мелкосерийного птицеводства. В схеме использовался датчик температуры LM35. В качестве основного контроллера системы также использовался PIC16F877A. Схема датчика температуры и микроконтроллера представлена на рисунке 1.10

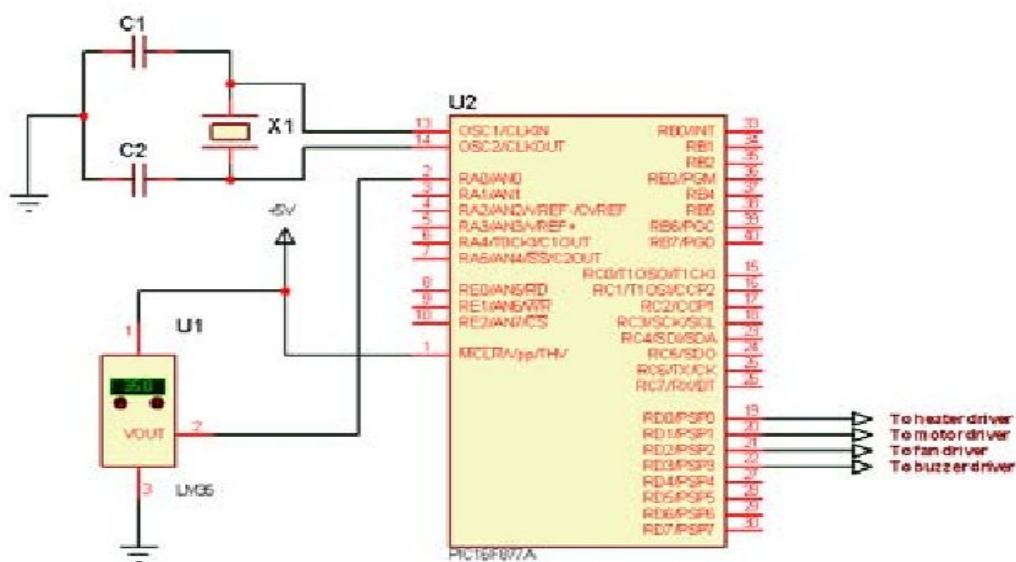


Рисунок 1.10 – Схема микроконтроллера и датчика температуры

В рамках исследования [115] был разработан прототип автоматизированного инкубатора для утиных яиц на базе микроконтроллера Arduino Uno (рисунок 1.11), учитывающего их биологические особенности (большой размер, более длительный инкубационный период - 28 дней, повышенные требования к влажности).

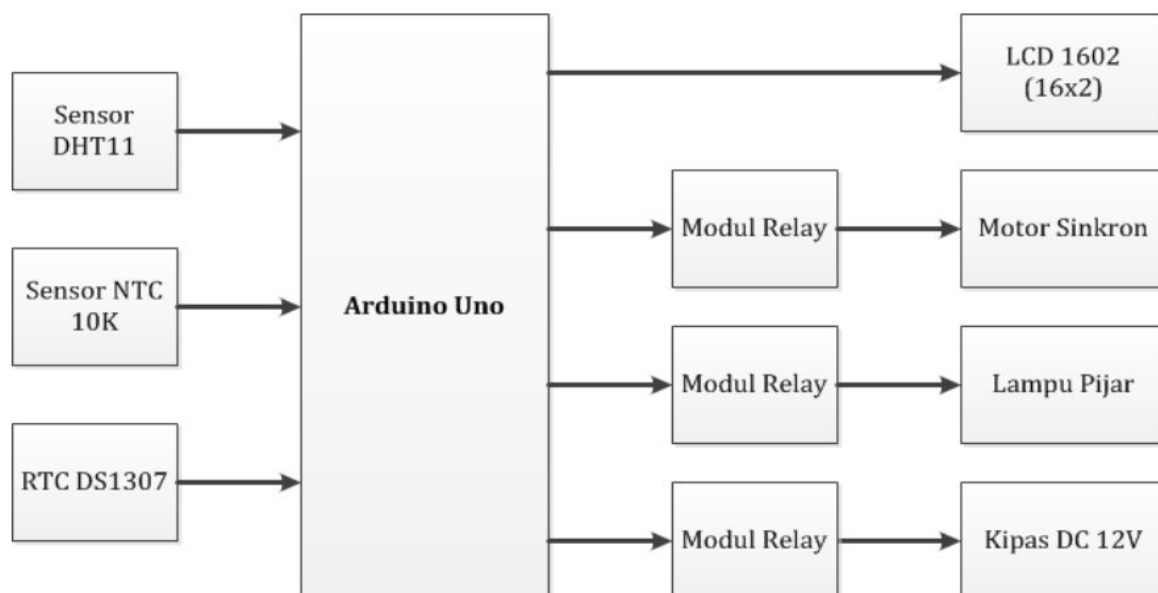


Рисунок 1.11 – Блок-схема системы инкубатора для яиц

Разработанный прототип демонстрирует высокую эффективность и практическую применимость. Его ключевое преимущество - адаптация под биологические особенности вида, что редко реализуется в универсальных коммерческих инкубаторах

Исследование [104] посвящено разработке интеллектуального солнечного инкубатора для яиц сельскохозяйственной птицы, ориентированного на использование в условиях отсутствия стабильного сетевого электроснабжения. Основная цель - создать автономное, низкочатратное устройство, сочетающее солнечную энергетику, микроконтроллерное управление и удалённый мониторинг через GSM. Интеграция солнечной энергетики, микроконтроллера и GSM/IoT-мониторинга обеспечивает высокую выводимость, энергоавтономность и удобство эксплуатации. Зарегистрированные показатели выводимости составили: перепела - 97,14%, куры - 95,45%, индейки - 95,6%, гуси - 95,24%. Блок-схема кода инкубатора представлена на рисунке 1.12.

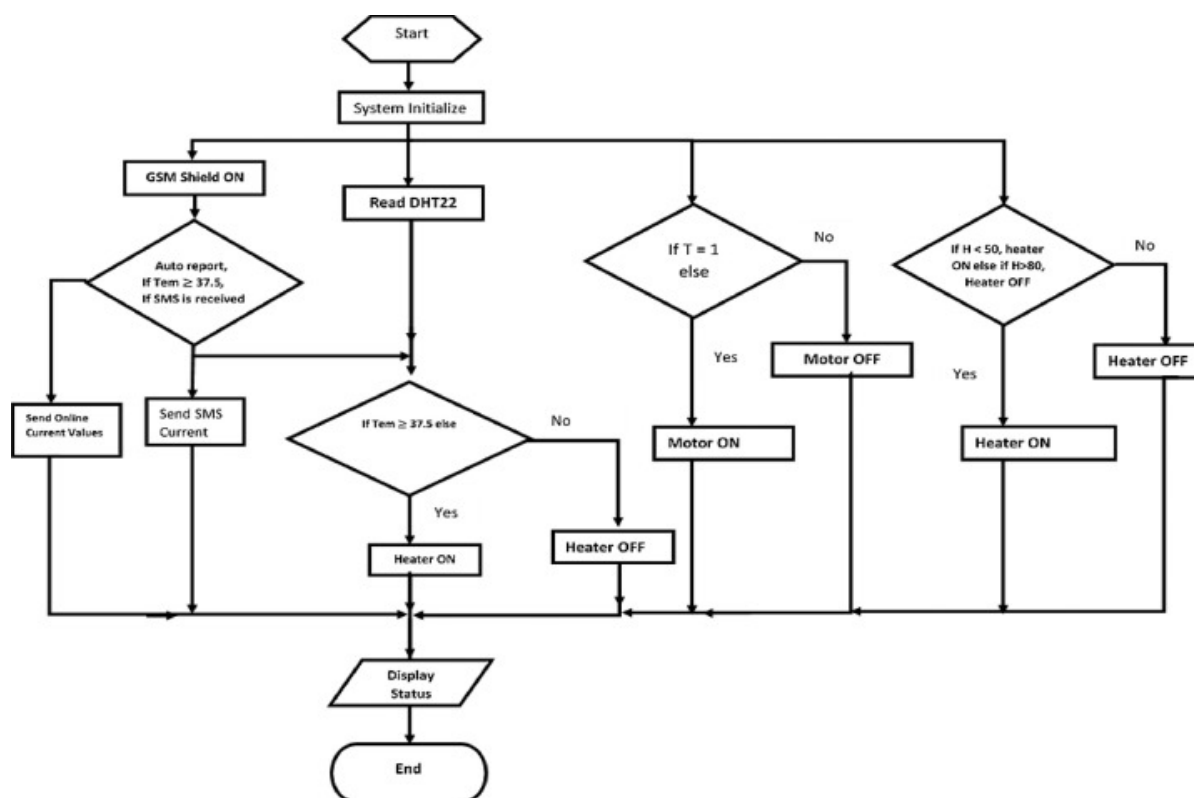


Рисунок 1.12 - Блок-схема GSM/IoT-инкубатора

Авторами исследования [100] был разработан интеллектуальный («умный») инкубатор на базе микроконтроллера ESP32, ориентированный на птицеводство в домашних условиях. Технология Интернета вещей (IoT) передает данные о температуре и влажности, которые в реальном времени отображаются на веб-интерфейсе и передаются на мобильные устройства [68, 69, 110].

В инкубаторе, разработанном в рамках исследования [95], используется автоматическое управляемое устройство, поддерживающее влажность на уровне 60–70% и температуру на уровне 37,5–37,8 °C, обеспечивает регулярный переворот яиц. Данная модель инкубатора адаптирована как для куриных, так и для утиных яиц. Количество выведенных яиц составило 56 (93%) утиных яиц и 48 (80%) куриных яиц.

Исследование, представленное в статье [96], направлено на разработку автоматизированного инкубатора для куриных яиц с резервным источником питания. Авторы стремятся обеспечить непрерывность инкубационного

процесса, повысить выводимость и сделать технологию доступной для мелких фермерских хозяйств. При программировании инкубатора авторы ориентировались на основные положения, представленные в статье [44]. Авторы данного проекта ориентировались на решения в конструкции инкубатора, описанные в статьях [48, 50, 112]. Полученная система обеспечивает непрерывную работу даже при многократных отключениях сети. При тестировании с 30 куриными яйцами выводимость достигла 86,7%. Авторы подчёркивают, что разработка сочетает низкую стоимость, энергонезависимость и простоту обслуживания.

В исследовании [101] автором представлена интеллектуальная инкубационная система, сочетающая в себе технологию Интернета вещей и смартфон, что делает систему более удобной для пользователя с точки зрения мониторинга и управления инкубационной системой. Блок-схема предлагаемого инкубатора представлена на рисунке 1.13

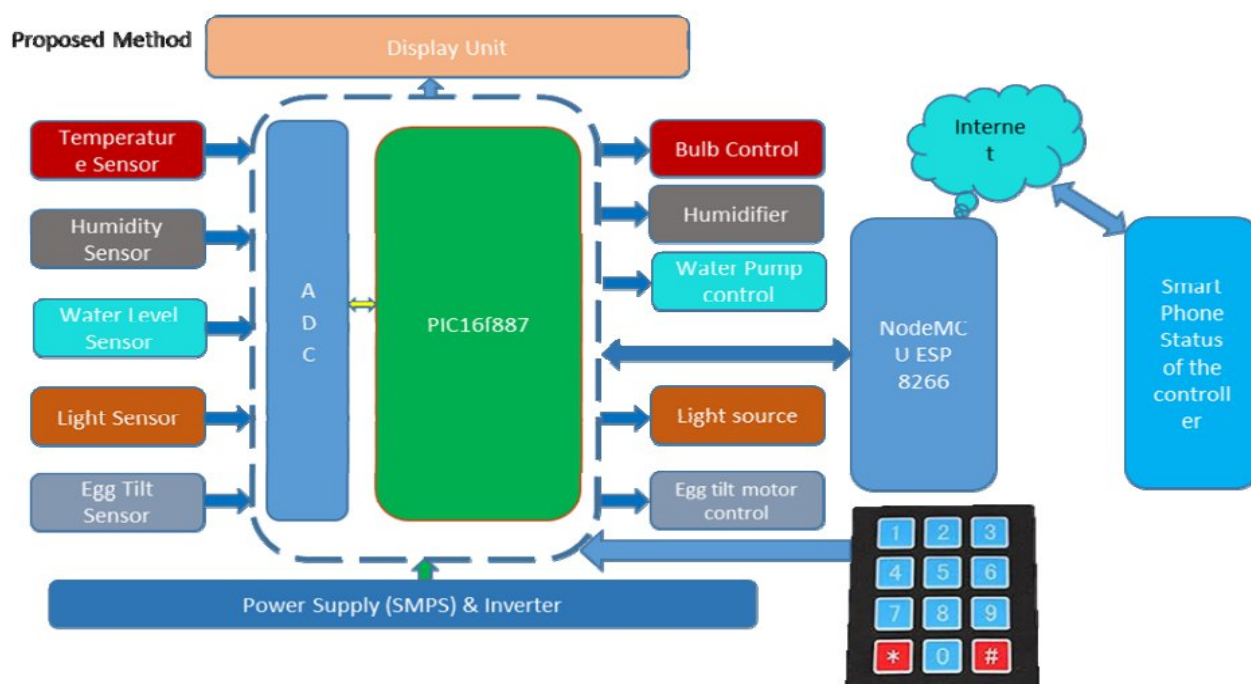
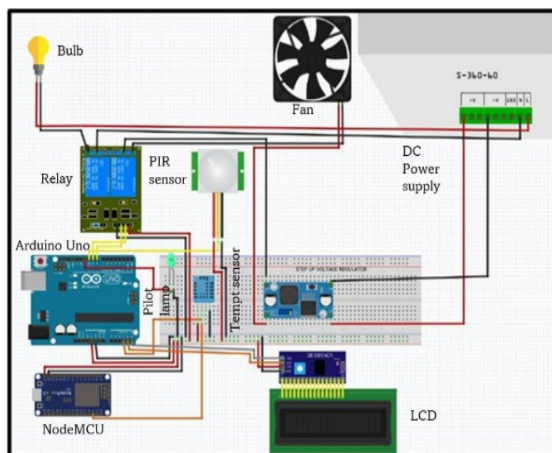


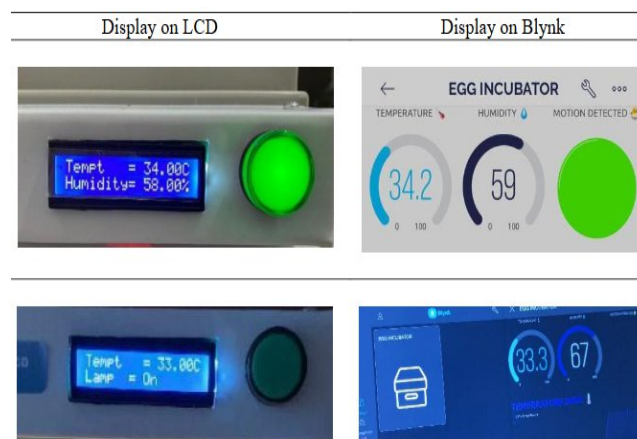
Рисунок 1.13 – Блок-схема предлагаемого инкубатора

Позже авторы доработали свою систему и в исследовании [78] представлена разработка прототипа автоматизированного инкубатора для куриных яиц с функцией удалённого мониторинга через мобильное

приложение Blynk. Схема предлагаемого инкубатора представлена на рисунке 1.14 (а). На рисунке 1.14 (б) приводится изображение основного меню на дисплее и интерфейс мобильного приложения Blynk для управления процессом инкубации.



а) схема инкубатора



б) отображение температуры на дисплее и приложении Blynk

Рисунок 1.14 – Блок-схема предлагаемого инкубатора

Интеграция Arduino, датчиков среды и облачного интерфейса Blynk обеспечивает не только автоматизацию, но и повышение надёжности инкубационного процесса за счёт своевременной реакции на аварийные ситуации. Разработанный прототип демонстрирует практическую применимость IoT-технологий в сфере мелких фермерских хозяйств.

Анализируя записанные данные температуры инкубатора при различных параметрах, пользуясь результатами исследований [55, 60, 71] и теоретическим материалом статьи [117], авторами статьи [107] представлено компьютерное моделирование энергоэффективного инкубатора для яиц сельскохозяйственной птицы, выполненного с использованием программного комплекса ANSYS Fluent на основе метода вычислительной гидродинамики (CFD - computational fluid dynamics). Исследование демонстрирует высокую эффективность CFD-моделирования для проектирования энергосберегающих инкубаторов.

Исследование [81] ориентировано на энергоэффективное проектирование инкубационных камер с использованием вычислительной гидродинамики. Авторы стремятся минимизировать энергопотребление и максимизировать равномерность микроклимата до физического изготовления устройства - за счёт виртуального прототипирования. В автоматизации инкубатора авторы опирались на статьи [46, 64, 101], в конструкционных решениях – на статью [45]. В качестве управляющего элемента использован микроконтроллер Arduino. Перенос принципов CFD из аэрокосмической и энергетической отраслей в сельскохозяйственное машиностроение, открывает путь к разработке рациональных, точных и недорогих инкубационных систем.

В исследовании [49] автор предлагает методику инженерного расчёта ключевых характеристик: тепловой мощности нагревателя, объёма инкубационной камеры, требуемой влажности и воздухообмена. Предложенная методика позволяет рационально подбирать компоненты (мощность ТЭНа, тип теплоизоляции, размеры камеры) при проектировании инкубаторов, избегая избыточного энергопотребления или недогрева. Работа носит прикладной расчётный характер и служит основой для последующего конструирования.

Авторами статьи [53] был создан полностью автоматизированный инкубатор, функционирующего от электрической сети и резервного аккумулятора, с целью обеспечения непрерывной работы в условиях нестабильного электроснабжения. При испытаниях с 60 куриными и утиными яйцами выводимость из оплодотворённых яиц - 100 %, общая выводимость куриных яиц - 80 %, выводимость утиных яиц – 93%. Система продемонстрировала устойчивость к перебоям с электричеством.

Инкубатор, представленный в работе [103] использует автоматизированную систему управления процессом переворачивания яиц, нагревателем и циркуляционным вентилятором на базе микроконтроллеров. Процент оплодотворённых яиц составил 55%, тогда как выводимость составила только 27%.

В статье [106] представлена автоматизированная система управления инкубатором на базе микроконтроллера ATmega16, которая обеспечивает поддержание оптимальных параметров микроклимата (температура, влажность, вентиляция, переворот яиц) без вмешательства человека.

Полностью автоматизированная система управления инкубатором для куриных яиц на базе микроконтроллера Arduino Mega 2560 в сочетании с упрощённым ПИД-регулятором представлена в работе [76], что позволило добиться стабильности микроклимата при минимальных затратах.

В работе [101] описан инкубатор на базе ESP32, подключённый к облачной платформе, что позволяет пользователю дистанционно отслеживать параметры и получать уведомления о нештатных ситуациях. Подобные решения особенно востребованы в условиях удалённого ведения хозяйства и при недоступности постоянного энергоснабжения, поскольку поддерживают резервное питание и автоматическое восстановление режима.

Авторы исследования [105] представили разработку автоматизированного инкубатора для яиц, использующего систему управления пропорционально-интегральной производной (PID) с гипернастройкой параметров, а также мониторинг температуры и влажности, наряду с системой защиты на основе датчиков напряжения, интегрированных с Интернетом вещей (IoT).

Целью исследования [121] являлось создание интеллектуального инкубатора для перепелиных яиц, сочетающего микроконтроллерное управление, IoT-мониторинг и человеко-центричный дизайн. Интеграция с принципами human-centered design повышает принятие технологии конечными пользователями. Возможность дистанционного контроля со смартфона (в том числе при отсутствии на месте), позволило снизить стресс у оператора за счёт автоматизации и обратной связи. Тестирование показало выводимость перепелиных яиц — 87,55% (218 из 249 яиц).

В рамках исследования авторами [123] был разработан интеллектуальный инкубатор для яиц UHTP (Universitas Hang Tuah

Pekanbaru), объединяющий в себе технологии Интернета вещей (IoT) и искусственного интеллекта (ИИ), в частности алгоритм нечёткой логики Mamdani, для повышения выводимости яиц. Инкубатор имеет автоматический контроль температуры и влажности, системы охлаждения и мониторинг в режиме реального времени с помощью мобильных устройств. Экспериментальные результаты показали, что инкубатор поддерживает оптимальную температуру от 37,7 °C до 38,8 °C, а успешное вылупление происходит на 19-й день (из 20 заложенных яиц на 19 день вылупились три птенца). Система искусственного интеллекта на основе нечёткой логики эффективно управляет изменениями окружающей среды, обеспечивая стабильный процесс вылупления за счёт динамической корректировки условий в инкубаторе. Прототип инкубатора UHTP Smart представлен на рисунке 1.15.



а) Дисплей инкубатора для яиц
UHTP Smart



б) дисплей блока управления
инкубатора

Рисунок 1.15 - Прототип инкубатора UHTP Smart

В статье [113] авторы разработали низкочастотный автоматизированный инкубатор на базе микроконтроллера Arduino Uno. Система не требует постоянного участия оператора, что снижает трудозатраты. Наблюдалась устойчивость к перебоям с питанием. Общая выводимость составила 76,7% (23 из 30 яиц), что на 25–40 процентных пунктов превышает по сравнению с выводимостью при ручном управлении инкубатором (настройка температуры, поддержание уровня влажности, переворот яиц).

В статье [22] представлена разработка и практическая реализация автоматизированной системы переворота яиц в бытовых инкубаторах, основанной на использовании программируемого логического контроллера (ПЛК) и механической передачи, обеспечивающей плавное изменение положения яиц. Система интегрирована в корпус инкубатора с возможностью регулировки под разные типы яиц. В результате было достигнуто повышение выводимости на 3–4% по сравнению с аналогами без автоматизированного переворота.

Исследование [9] посвящено практическим агротехническим и технологическим мерам, направленным на повышение выводимости инкубационных яиц в условиях малых и средних птицеводческих хозяйств.

1.4 Обзор методов расчёт теплообмена в инкубаторе

Температурный режим является критически важным фактором успешной инкубации яиц птицы, непосредственно влияющим на эмбриональное развитие, выводимость и последующее здоровье птенца. Поддержание оптимальной температуры 37,5°C обеспечивает нормальное протекание метаболических процессов в развивающемся эмбрионе. Однако существующие системы инкубации часто не учитывают комплексного влияния таких параметров, как скорость воздушного потока и геометрические характеристики яиц, на динамику теплопереноса.

Проведенный анализ литературных источников показал, что проблема точного контроля теплового режима инкубации является комплексной и требует междисциплинарного подхода, объединяющего теплофизику, физиологию и теорию автоматического управления. Фундаментальные основы процессов тепломассопереноса подробно изложены в классических трудах [54, 58, 80], где приведены аналитические решения уравнения теплопроводности для канонических тел, включая сферические объекты, что является базисом для разработки упрощенных моделей. Динамический аспект

и вопросы управления инженерными системами рассмотрены в работе [87], которая предоставляет методологию для создания моделей в пространстве состояний.

Непосредственно задачам моделирования теплообмена в яйцах посвящены экспериментальные и теоретические исследования. В работе [70] установлено влияние размера яйца и конструкции инкубатора на температурный режим, а в [97] предложена математическая модель, учитывающая совместный тепло- и массообмен. Выявленная зависимость между размером яйца, тепловыделением, разностью температур между яйцом и окружающим воздухом при разных уровнях скорости воздуха представлена на рисунке 1.16.

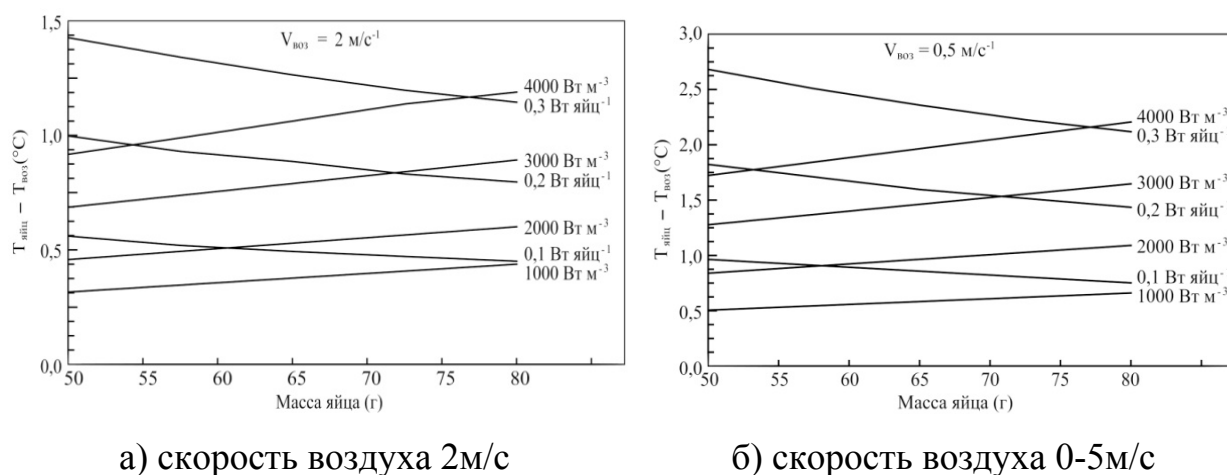


Рисунок 1.16 - Расчетная разница температур между яйцом (положение зародыша) и окружающим воздухом при разных уровнях тепловыделения и скорости воздуха

На начальных этапах проектирования инкубационного оборудования широко используются упрощённые аналитические модели, базирующиеся на уравнениях теплового баланса [49, 70]. Такие модели позволяют быстро оценить основные теплофизические параметры системы. Например, для оценки температуры яйца в стационарном режиме может применяться следующее соотношение [97]:

$$T_{я} = T_{in} + \frac{H_{emb} - H_{water loss}}{K}, \quad (1.1)$$

где $T_{я}$ - температура яйца, °C; T_{in} - температура воздуха в инкубаторе, °C; H_{emb}

- тепло, выделяемое развивающимся эмбрионом, Вт; $N_{\text{water loss}}$ - потери тепла при испарении влаги, Вт; K - обобщённый коэффициент теплообмена, Вт/°С.

При описании распределения температуры в вентиляционных каналах инкубатора с учётом конвективного переноса тепла используется уравнение, выводимое из закона сохранения энергии для контрольного объёма [58]. В стационарном одномерном случае для потока воздуха в канале изменение температуры вдоль направления движения, согласно работе [97], описывается соотношением:

$$\frac{\dot{m}c_p dT}{dx} = q_1' - q_2', \quad (1.2)$$

где $\dot{m}$ - массовый расход воздуха, кг/с; c_p - удельная теплоёмкость воздуха при постоянном давлении, Дж/(кг·°С); q_1' - погонная мощность теплоподвода от нагревателя, Вт/м; q_2' - погонные теплопотери в окружающую среду, Вт/м; x - координата вдоль канала, м. При постоянной плотности воздуха ρ и площади поперечного сечения канала A массовый расход связан со скоростью соотношением $\dot{m} = \rho AU$, где U - скорость потока. Решение этого уравнения позволяет найти распределение температуры по длине канала и оценить эффективность вентиляционной системы [94].

Более современные подходы, включая разработку моделей в пространстве состояний для прецизионного контроля, представлены в [98], тогда как в [57] приведены экспериментальные данные по количественной оценке теплового потока (рисунок 1.17).

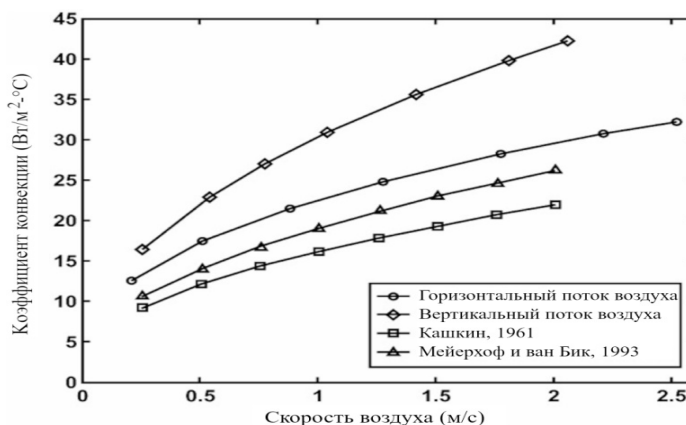


Рисунок 1.17 – Сравнение экспериментальных коэффициентов теплопередачи при конвекции в зависимости от скорости воздуха

Перспективным направлением является применение методов вычислительной гидродинамики, как продемонстрировано в [86] для анализа трехмерных полей температуры и влажности.

Для более точного описания нестационарных процессов теплообмена разрабатываются многомерные математические модели, учитывающие многофакторность системы [86, 107]. Инкубатор при этом моделируется как совокупность взаимодействующих зон: зона инкубирования (лотки с яйцами), зона нагрева, вентиляционные каналы, ограждающие конструкции [28].

В двумерной постановке уравнение переноса тепла для зоны инкубирования с учётом тепловыделения эмбрионов имеет вид [86]:

$$C_r \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{U \partial T}{\partial x} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q(x, y, t), \quad (1.3)$$

где C_r - среднесмешанная теплоёмкость зоны инкубирования (с учётом яиц и воздуха), Дж/(м³·°C); U - скорость воздушного потока, м/с; λ - среднесмешанная теплопроводность, Вт/(м·°C); $q(x, y, t)$ - удельное объёмное тепловыделение яиц, зависящее от стадии эмбрионального развития, Вт/м³ [93, 116].

Критически важным для верификации моделей является учет физиологии эмбриона и его метаболического тепловыделения. В работе [116] систематизированы данные о тепловом режиме эмбриона, а в [80, 93] экспериментально показана взаимосвязь между температурой скорлупы, метаболизмом и развитием эмбриона. Влияние ключевых операционных параметров, таких как скорость воздушного потока, детально проанализировано в [94], а последствия отклонения температуры от оптимума - в [82].

Для решения сложных нелинейных уравнений в частных производных применяются численные методы. Наиболее распространённым является метод контрольных объёмов, реализованный в пакетах вычислительной гидродинамики (CFD) типа ANSYS Fluent и OpenFOAM [86]. Этот метод

позволяет строить решения на нерегулярных расчётных сетках, что важно для учёта сложной геометрии инкубатора — лотков, вентиляторов, датчиков [107].

При численном моделировании могут учитываться:

- ~ распределение температуры внутри яйца с разбиением на квазислои (скорлупа, белок, желток, воздушная камера) [97];
- ~ изменение тепловыделения яиц в зависимости от стадии развития эмбриона [80, 93];
- ~ влияние вентиляции и расположения воздухопроводов на равномерность температурного поля [70, 94].

Однако CFD-моделирование требует значительных вычислительных ресурсов и тщательной верификации экспериментальных данных, что ограничивает его применение на этапе оперативного проектирования [86].

Климатические условия (температура и влажность окружающей среды) существенно влияют на тепловой режим инкубатора, особенно в регионах с экстремальным климатом [104, 117]. При высокой внешней температуре стационарный тепловой поток через ограждающие конструкции описывается законом Фурье [54]:

$$Q = \frac{k_{ins} \cdot A}{d} (T_{out} - T_{in}), \quad (1.4)$$

где k_{ins} - коэффициент теплопроводности изоляции, Вт/(м·°C); A — площадь поверхности, м²; d — толщина изоляции, м; T_{out} - температура окружающей среды, °C; T_{in} - температура воздуха в инкубаторе, °C. Положительное значение Q означает потери тепла, отрицательное — его поступление извне, что требует изменения алгоритма терморегулирования [28].

Современные тенденции связаны с применением интеллектуальных систем управления и неинвазивных методов мониторинга, что отражено в исследованиях [47, 114]. Авторами в работе [114] представлена экспертная система для контроля влажности и температуры с использованием ANFIS и оптимизации на основе нечеткого моделирования (рисунок 1.18).

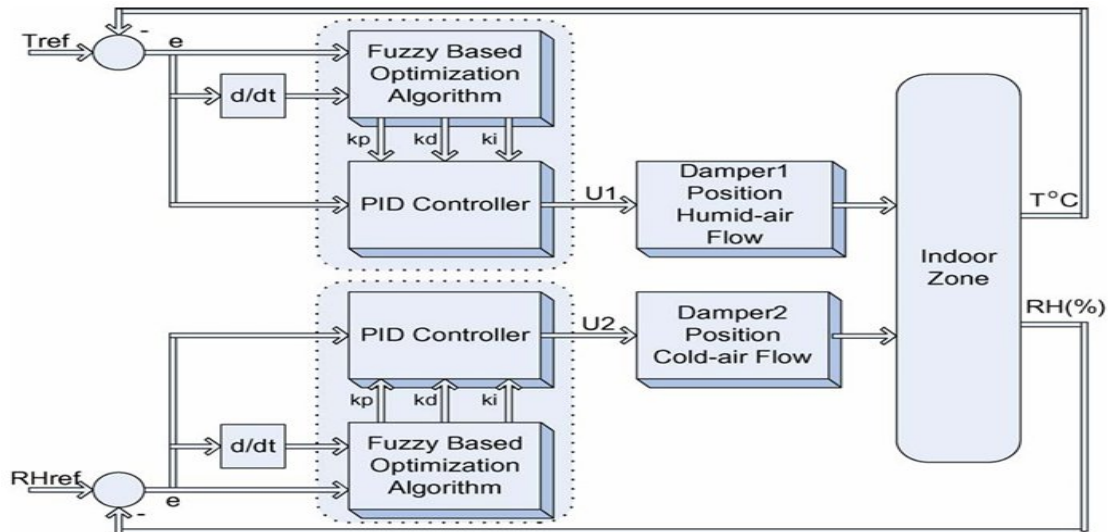


Рисунок 1.18 – Блок-схема рассматриваемой системы и оптимизация на основе нечеткой логики

Для управления тепловым режимом в автоматизированных инкубаторах применяются различные типы систем терморегулирования [29, 76, 105]:

~ Релейные системы - работают по принципу включение/выключение нагревателя при достижении пороговых значений. Важным параметром является зона нечувствительности (гистерезис), которая должна соответствовать физиологическим пределам развития эмбриона ($\pm 0,2 \dots \pm 0,3$ °C) [29].

~ ПИД-регуляторы - обеспечивают более точное поддержание температуры путём непрерывного регулирования мощности. Передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид [76, 105]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1.5)$$

где $u(t)$ - управляющий сигнал (мощность нагревателя); $e(t)$ - ошибка регулирования (разность между уставкой и текущей температурой); K_p , K_i , K_d - коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих соответственно.

~ Интеллектуальные системы с использованием нечёткой логики и нейронных сетей позволяют прогнозировать изменение температуры и осуществлять упреждающую коррекцию режимов [105, 114].

Общий контекст и эволюцию научных представлений об инкубации предоставляют обзорные работы и коллективные монографии [63, 120, 122], тогда как исследование [119] устанавливает фундаментальную связь между газообменом и энергетическим метаболизмом эмбриона, необходимую для создания комплексных физико-биологических моделей.

Большинство исследований в области теплового моделирования процессов инкубации сосредоточено либо на изучении энергетики эмбрионального развития, либо на анализе конструктивных особенностей инкубаторов. Вместе с тем, недостаточное внимание уделяется комплексному моделированию нестационарного теплообмена с учетом взаимного влияния гидродинамических и геометрических факторов. Особую актуальность приобретает разработка математических моделей, позволяющих оптимизировать режимы инкубации для яиц различного размера.

1.5 Заключение по обзору литературы

Развитие технологий инкубации яиц знаменует переход к принципиально новому уровню организации процесса. На смену традиционным утеплённым камерам приходят высокотехнологичные автоматизированные комплексы, объединяющие целый ряд инженерных решений. Конструктивные особенности современных инкубаторов включают применение плёночных нагревательных элементов, обеспечивающих равномерное распределение тепловой энергии, внедрение систем зонального нагрева, позволяющих дифференцированно регулировать температуру в разных секциях камеры, оснащение мощными вентиляционными модулями с принудительной циркуляцией воздуха для поддержания оптимального микроклимата и автоматизацию процесса переворота яиц — это исключает человеческий фактор и гарантирует соблюдение временных интервалов.

Ключевым элементом управления выступает микроконтроллерная система. Она позволяет программировать сложные температурные профили,

в том числе термоконтрастные режимы. Такие режимы имитируют естественные условия, создаваемые наседкой: небольшие колебания температуры, близкие к реальным условиям высиживания. Это способствует более точному контролю микроклимата внутри камеры рациональному использованию энергоресурсов и повышению процента выводимости здорового молодняка.

Вместе с тем в отрасли сохраняются нерешённые задачи, требующие комплексного подхода

- ~ отсутствие единых методик оценки качества инкубационного материала — разные производители и лаборатории применяют собственные критерии, что затрудняет сравнение результатов;

- ~ необходимость стандартизации протоколов передачи данных в IoT-системах — разнородность форматов и интерфейсов мешает интеграции оборудования от разных поставщиков;

- ~ проблема встраивания результатов диагностики в замкнутый цикл управления инкубатором — данные о состоянии яиц часто не используются для оперативной коррекции параметров инкубации.

Решения этих вопросов станет важным шагом на пути к созданию полностью автоматизированных, саморегулируемых инкубационных систем нового поколения.

Исходя из анализа литературы, патентов и научных статей, комплексное использование системы компьютерного зрения (СКЗ) и тепловизора на ключевых этапах инкубации позволяет существенно повысить процент вывода за счёт объективного контроля, ранней диагностики и оптимизации условий развития эмбрионов. Точная предварительная сортировка (СКЗ) позволит исключить закладку яиц с микротрещинами, аномальной формой, загрязнениями. А также применение тепловизора при переводе яиц в выводную камеру — эффективный инструмент ранней диагностики состояния эмбрионов и оптимизации условий вывода. Это напрямую ведёт к росту процента выводимости и улучшению качества молодняка.

Таким образом, целью диссертационной работы является исследование физических методов и реализация технологических решений, способствующих оптимизации ресурсозатрат и повышению выводимости при инкубации яиц кур яичных кроссов.

Глава 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной главе рассмотрены вопросы, относящиеся к организации и выполнению работы, выбору объектов и методов исследований.

2.1 Организация выполнения работы

Основные экспериментальные исследования и теоретические работы выполнены в соответствии с поставленной целью на кафедре Мехатроники и автоматизации технологических систем, Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кемеровский государственный университет». Общая схема проведения исследований приведена на рисунке 2.1.

Объектом исследования являются инкубационные яйца кур яичных кроссов: «Хайсекс Браун», «Ломанн Браун». Возраста родительского стада — 30–40 недель, что соответствует пиковому периоду яйценоскости и обеспечивает высокий процент оплодотворённости.

Диссертационная работа состоит из нескольких последовательных этапов:

Первый этап работы посвящен формированию цели и задач исследования, проведению анализа литературных источников, отражающих технологии инкубации яиц сельскохозяйственных птиц, а также описаны технологии использования микроконтроллеров в управлении работой инкубатора, применяемых для вывода яиц сельскохозяйственных птиц. Следующим этапом был выбор объектов и методов исследования. После проведены работы по разработке лабораторного варианта системы компьютерного зрения для оценки яиц сельскохозяйственных птиц перед инкубацией, выбору и обоснованию основных элементов лабораторного варианта системы. Дальнейшие исследования посвящены проведению расчёта теплообмена внутри инкубатора для оптимизации режимов его работы,

разработки лабораторного образца инкубатора на базе микроконтроллера Arduino для вывода сельскохозяйственной птицы.

Окончательным этапом работы является практическая реализация результатов исследований.



Рисунок 2.1 – Схема выполнения диссертационной работы

2.2 Методика определения физических характеристик яиц и категорий куриных яиц

Целью данной методики является объективное определение ключевых физических параметров куриных яиц и их последующая классификация по установленным категориям на основе полученных данных.

В работе использовались куриные яйца, отобранные для анализа. Перед измерениями яйца должны быть чистые, сухие, без видимых повреждений скорлупы.

Для установления основных физических характеристик яйца, являющихся критериями для его категоризации, проводятся следующие измерения:

~ Масса: Определение массы каждого яйца проводилось с использованием аналитических весов. Яйцо аккуратно размещалось на чаше весов, показания считывались после стабилизации значения. Точность весов обеспечивала необходимую достоверность измерения.

~ Размеров продольного (большого) и поперечного (малого) диаметров яйца. Соотношение диаметров характеризует форму яйца и выражается через индекс формы (ИФ) который рассчитывается по формуле (2.1).

$$ИФ = \frac{D_{min}}{D_{max}} \cdot 100\%. \quad (2.1)$$

Оптимальные значения этого показателя лежат в диапазоне 72–76 %. Измерения продольных (больших) (L) и поперечных (малых) (B) диаметров производились штангенциркулем ШЦ-1 (рисунок 2.2).

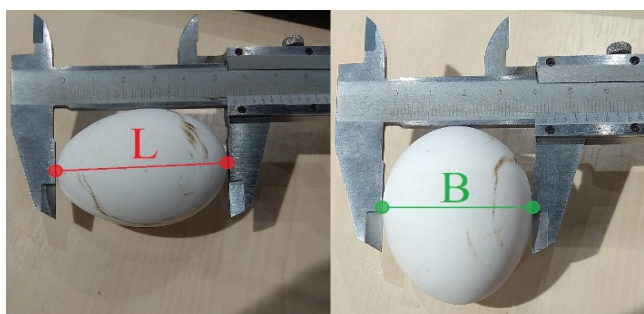


Рисунок 2.2 – Измерение продольного (большого) и поперечного (малого) диаметра яйца

Классификация проводится в соответствии с действующими стандартами ГОСТ Р 70610-2022 «Яйца куриные инкубационные для иммунобиологических производств. Технические условия» и ОСТ 10321-2003 «Яйца куриные инкубационные. Технические условия».

Для обеспечения надежности и точности результатов все измерения (массы и обоих диаметров) проводились в трех повторениях для каждого отдельного яйца. Это означает, что каждое яйцо трижды взвешивалось, и трижды измерялись его продольный и поперечный диаметры.

На основании полученных в трех повторениях данных для каждого яйца:

~ Рассчитывалось среднее арифметическое значение для массы яйца (2.2).

$$m_{cp} = \frac{m_1 + m_2 + m_3}{3} \quad (2.2)$$

~ Рассчитывалось среднее арифметическое значение для продольного (большого) диаметра (2.3).

$$D_{max_{cp}} = \frac{D_{max1} + D_{max2} + D_{max3}}{3} \quad (2.3)$$

~ Рассчитывалось среднее арифметическое значение для поперечно (малого) диаметра (2.4).

$$D_{min_{cp}} = \frac{D_{min1} + D_{min2} + D_{min3}}{3} \quad (2.4)$$

Эти усредненные значения (m_{cp} , $D_{max_{cp}}$, $D_{min_{cp}}$) являются финальными параметрами яйца, используемыми для дальнейшего анализа и категоризации.

2.3 Методика определения категорий яиц на основе компьютерного зрения

Методика определения категорий яиц с применением технологий компьютерного зрения направлена на автоматизацию и повышение точности сортировки куриных яиц по ключевым параметрам — размеру, форме и наличию внешних дефектов. Алгоритм работы управляющей программы

системы компьютерного зрения в виде блок-схемы представлен на рисунке 2.3.

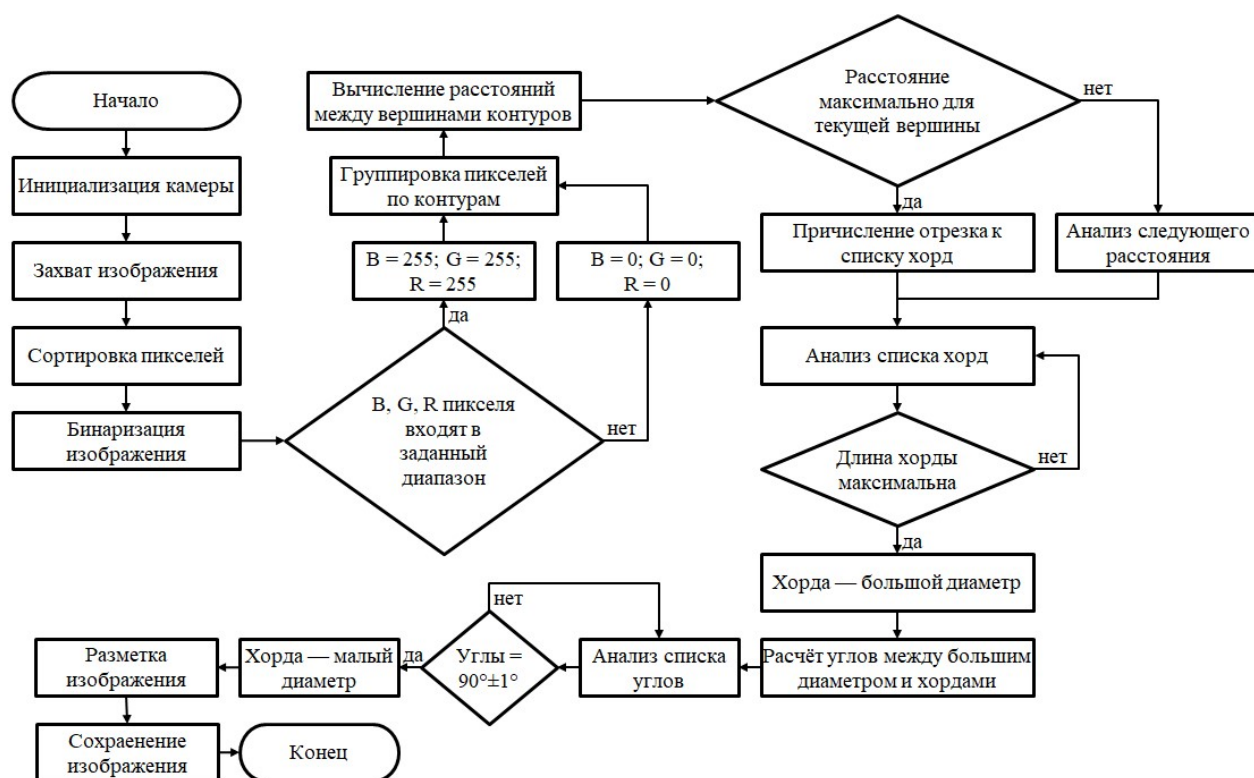


Рисунок 2.3 – Алгоритм работы управляющей программы системы компьютерного зрения

Этапы исследования включают следующие пункты:

1. Инициализация камеры

На первом этапе осуществляется настройка оборудования для получения изображений. В среде программирования создаётся объект класса USB-видеокамер с использованием библиотеки OpenCV-Python. Это позволяет установить соединение с камерой, задать базовые параметры съёмки (например, разрешение, яркость, контрастность) и подготовить устройство к захвату изображения. Инициализация включает проверку доступности камеры и корректности её подключения к системе.

2. Захват изображения

После успешной инициализации камеры программа выполняет захват кадра. Снимок делается в заранее заданном разрешении, которое

оптимизировано для баланса между детализацией изображения и скоростью обработки данных. Полученное изображение сохраняется в виде графического файла (например, в формате JPG или PNG) во временной директории (см. рисунок 3.4 в п. 3.2). Высокое качество снимка критически важно для точности последующих этапов анализа.

3. Сортировка пикселей

На данном этапе выполняется предварительная обработка цифрового изображения с целью выделения объекта исследования — куриного яйца — на фоне прочих элементов сцены. Процедура включает спектральный анализ каждого пикселя в цветовом пространстве RGB, охватывающем красный, зелёный и синий каналы, установление пороговых значений интенсивности для каждого цветового канала на основе статистических характеристик выборки и бинарную классификацию пикселей. К целевой группе относят пиксели, чьи цветовые характеристики соответствуют эталонным параметрам поверхности яйца. К фоновой группе относят все остальные пиксели — фон, посторонние объекты и шумы. Результатом сегментации становится бинарная маска (см. рисунок 3.5 в П. 3.2). В ней область яйца представлена связным набором пикселей, а фон — нулевыми значениями. Такая маска служит основой для последующего контурного анализа и геометрического измерения объекта.

4. Формирование связных областей и выделение контуров

После завершения сегментации алгоритм приступает к пространственной обработке целевых пикселей. Ключевые операции кластеризация пикселей в связные области на основе топологической близости, применение алгоритма обнаружения границ для выделения резких перепадов интенсивности, соответствующих краям объекта, использование функций поиска контуров библиотеки OpenCV для формирования замкнутых векторных контуров, и фильтрация ложных контуров по критериям площади, формы и положения. Итогом этапа является набор замкнутых контуров, точно описывающих внешние границы яиц на изображении. Контуры представлены

в виде упорядоченных последовательностей точек — вершин, пригодных для геометрического анализа.

5. Геометрический анализ контуров: расчёт межточечных расстояний

Для количественной оценки формы и размеров каждого яйца выполняется детальный анализ его контура идентификация ключевых точек контура — точек с максимальной кривизной либо равномерно распределённых вдоль периметра, попарное вычисление расстояний между всеми вершинами контура и формирование матрицы расстояний для каждой пары вершин. Полученные метрические данные служат основой для определения габаритных размеров яйца и расчёта показателей, характеризующих его форму: овальность и асимметрия.

Расстояния от каждой вершины до всех вершин контура вычисляется в декартовой системе по формуле (2.5):

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (2.5)$$

где d — расстояние между точками, x_1 и y_1 — абсцисса и ордината первой точки соответственно, x_2 и y_2 — абсцисса и ордината второй точки соответственно. В качестве абсцисс выступают номера пикселей в строке, ординат — номера строк в изображении.

6. Идентификация продольного (большого) диаметра яйца

Большой диаметр определяется как максимальное линейное расстояние между двумя точками контура. Алгоритм реализует следующий подход, перебор всех возможных хорд, соединяющих пары вершин контура, расчёт длины каждой хорды через расстояние между её конечными точками, выбор хорды с максимальной длиной — она соответствует большому диаметру яйца и верификация результата: проверка, что выбранная хорда лежит внутри контура и не пересекает его границы. Хорда максимальной длины определяется с помощью функции `max()` языка программирования Python.

Результат фиксируется как значение большого диаметра в пикселях. Оно соответствует наибольшему габаритному размеру яйца.

7. Определение поперечного (малого) диаметра яйца

Малый диаметр вычисляется относительно ранее найденного большого диаметра путем построения линии большого диаметра, соединяющей две вершины с максимальным расстоянием, вычисление перпендикуляра к линии большого диаметра для каждой точки контура, определение точек пересечения перпендикуляров с контуром, расчёт длин всех перпендикуляров и выбор максимальной длины среди них — это и есть малый диаметр. Дополнительно выполняется проверка корректности. Малый диаметр должен быть перпендикулярен большому и лежать внутри контура.

Вычисление угла между линией большого диаметра и хордами проводится по формуле (2.6):

$$\alpha = \arccos\left(\frac{x_1x_2+y_1y_2}{\sqrt{x_1^2+y_1^2}\sqrt{x_2^2+y_2^2}}\right) \quad (2.6)$$

где α – угол между хордой и отрезком большого диаметра, x_1 и y_1 – абсцисса и ордината конца вектора большого диаметра соответственно, x_2 и y_2 – абсцисса и ордината конца вектора хорды соответственно. Координаты концов отрезков хорд, имеющие меньшие значения относительно координат других концов, приравниваются к нулю с дальнейшим вычитанием их значений из значений координат оставшихся концов. Таким образом векторы хорд и большого диаметра преобразуются в радиус-векторы для упрощения вычисления угла между ними.

8. Визуализация и экспорт результатов

Итоговый этап включает пометку исходного изображения с использованием графических примитивов путем отрисовки контуров яиц линиями, нанесение отрезков, обозначающих большой и малый диаметры, вывод числовых значений диаметров в пикселях либо в миллиметрах с учётом масштабного коэффициента, полученного калибровкой камеры и добавление

подписей с категорией яйца в случае выполнения классификации. Полученное и изображение сохраняется в формате PNG или JPEG во временную директорию (см. рисунок 3.6 в П. 3.2). Файл используется для нескольких целей: визуальный контроль корректности работы алгоритма оператором, верификация точности измерений путём сравнения с ручными замерах и входные данные для модуля автоматической классификации яиц по категориям — с учётом ГОСТ, размера и формы. Пороговые значения для отнесения к категории по массе представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Категории куриных яиц по массе

Категория	C1	C2	C3	C0	CB
Масса	55–64,9г	45–54,9г	35–44,9г	65–74,9г	от 75г

Пороговые значения для отнесения к направлению продуктивности по индексу формы представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Классификация яиц по индексу формы

Направление продуктивности	Индекс формы
Яичные	до 75%
Мясные	от 76%

Максимально допустимый индекс формы для инкубационных яиц составляет 78%.

2.4 Методика расчёта теплообмена в инкубаторе

В данном разделе представлена методика расчёта нестационарного теплообмена куриного яйца в условиях вынужденной конвекции, предназначенная для определения оптимальных параметров инкубации (температурных режимов и скорости воздушного потока) для яиц различного размера.

При разработке методики приняты следующие допущения, обоснованные в работах [54, 58, 79]:

1. Яйцо аппроксимируется идеальной сферой. Отклонение реальной формы куриного яйца от сферической составляет не более 15–20%, что при оценке времени прогрева даёт погрешность, не превышающую 10%.

2. Внутреннее содержимое яйца (белок и желток) заменяется водой как основным компонентом. Массовая доля воды в свежем курином яйце составляет 85–88%. Теплофизические свойства остальных компонентов (белков, липидов, минеральных веществ) близки к свойствам воды. Принятые значения теплофизических параметров при температуре 37,5 °C [58]: коэффициент теплопроводности $k = 0,6 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, коэффициент температуропроводности $\alpha = 0,15 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Погрешность такой аппроксимации не превышает 10–15%, что допустимо для инженерных расчётов.

3. Термическое сопротивление скорлупы не учитывается, так как толщина скорлупы куриного яйца составляет 0,2–0,4 мм, коэффициент теплопроводности известковой скорлупы $k_{shell} \approx 0,7\text{--}0,8 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$. Термическое сопротивление скорлупы $R_{shell} = \frac{\delta}{k_{shell}} \approx 0,0005 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$.

4. Начальное температурное поле яйца равномерно, что соответствует условиям перед закладкой в инкубатор после выдерживания при комнатной температуре ($T_i = 28^\circ\text{C}$) [93].

5. На поверхности яйца действуют граничные условия третьего рода (конвективный теплообмен с окружающим воздухом), температура воздуха в инкубаторе поддерживается на уровне $T_\infty = 37,5^\circ\text{C}$. [94].

Температурное поле внутри яйца описывается уравнением теплопроводности Фурье в сферических координатах при условии сферической симметрии [54, 58]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), 0 \leq r \leq R, t > 0 \quad (2.7)$$

где: $T(r,t)$ - температура в точке на расстоянии r от центра яйца, °C; t - время, с; α - коэффициент температуропроводности, м²/с; $R = D/2$ - радиус яйца, м.

Начальное условие (температура яйца равномерна в начальный момент времени) [93]:

$$T(r,0) = T_i = 28^\circ\text{C}, 0 \leq r \leq R \quad (2.8)$$

Граничное условие третьего рода (конвективный теплообмен на поверхности яйца) [54, 58]:

$$-\left. \frac{k \partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = h(T(R,t) - T_\infty), t > 0 \quad (2.9)$$

где: k - коэффициент теплопроводности содержимого яйца, Вт/(м·°C); h - коэффициент конвективной теплоотдачи на поверхности, Вт/(м²·°C); $T(R,t)$ - температура поверхности яйца в момент времени t , °C.

Для сферической геометрии при граничных условиях третьего рода уравнение (2.7) имеет аналитическое решение в виде бесконечного ряда. Безразмерная температура в центре сферы $T_c(t)$ выражается как (2.10):

$$\frac{T_c(t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 F_o} \quad (2.10)$$

где θ – безразмерная величина, обозначающая изменение температуры, $T_c(t)$ – температура в центре яйца, °C, $F_o = \frac{\alpha t}{D^2}$ – число Фурье.

Константы A_1 и λ_1 являются функциями числа Bi , которое характеризует соотношение внутреннего и внешнего термических сопротивлений (2.11):

$$Bi = \frac{hD}{k} \quad (2.11)$$

где h - коэффициент конвективного теплообмена на поверхности яйца, а k - коэффициент теплопроводности.

Физический смысл числа Био:

- $Bi < 0,1$ - термически тонкое тело (температурное поле равномерно);
- $0,1 < Bi < 1$ - переходный режим (необходим учёт как внутреннего, так и внешнего сопротивлений);
- $Bi > 1$ - термически массивное тело (существенный градиент температуры).

Значение A_1 и λ_1 определялись методом табличной интерполяции по классическому решению задачи нестационарной теплопроводности для сферы [94]. Использовалась таблица значений Bi , A_1 и λ_1 в диапазоне $Bi = 0,01-100$, рассчитанная на основе характеристического уравнения (2.12):

$$1 - \lambda \cot \lambda = Bi \quad (2.12)$$

Для расчёта коэффициента конвективной теплоотдачи h при поперечном обтекании сферы потоком воздуха используется критериальное уравнение [54, 94]:

$$Nu = 2 + (0,4 \cdot Re^{\frac{1}{2}} + 0,06 \cdot Re^{\frac{2}{3}}) \cdot Pr^{0,4}, \quad (2.13)$$

где $Nu = hD/k_{air}$ - число Нуссельта; $Re = vD/\nu$ - число Рейнольдса; Pr - число Прандтля для воздуха (при $37,5^\circ\text{C}$ $Pr \approx 0,71$).

Для диапазона скоростей, характерных для бытовых и фермерских инкубаторов ($v = 0,5-2,0$ м/с), также может использоваться упрощённая эмпирическая зависимость, предложенная в работе [94] и верифицированная экспериментально:

$$h = 0.336 \times 4.184 \times (1.46 + \sqrt{100v}) \quad (2.14)$$

где v – скорость воздуха (в м/с) вокруг яйца. Коэффициент 4,184 обеспечивает перевод из калорий в джоули, численные значения 0,336 и 1,46 получены из критериальных уравнений для поперечного обтекания сферы.

На основе представленного математического описания разработан алгоритм, реализованный в среде Python. Алгоритм включает следующие шаги:

1. Инициализация вычислительной среды и загрузка исходных данных. Используются специализированные библиотеки: `matplotlib.pyplot`, `numpy`, `csv`. Критически важным элементом методологии является загрузка предварительно рассчитанных табличных значений коэффициентов A_1 и λ_1 из файла "AA.txt", которые определяют зависимость параметров теплопереноса от числа Био. Эти коэффициенты получены из аналитического решения характеристического уравнения для сферической геометрии;

2. Преобразование данных в массивы NumPy после их успешной загрузки;
3. Сортировка массивов по возрастанию значений числа Био, которая необходима для обеспечения корректной работы алгоритма интерполяции.
4. Определение функции `find_nearest_value`, реализующей алгоритм табличной интерполяции методом ближайшего соседа.
5. Реализация систематического параметрического исследования теплообменных характеристик биологического объекта в условиях вынужденной конвекции.
6. Установление базовых термодинамических параметров системы путём вычислительного эксперимента: температуры окружающей среды $37,5^{\circ}\text{C}$ и коэффициента теплопроводности $0,6 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$, характерный для яичной массы.
7. Формирование массива геометрических параметров объектов исследования – диаметров от 37 до 41 мм с шагом 1 мм, что соответствует естественному разбросу размеров птичьих яиц.
8. Графическое отображение результатов на двух независимых координатных плоскостях.
9. Инициализация процесса табличного вывода рассчитанных параметров с форматированием, обеспечивающим удобочитаемость числовых данных.
10. Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи по эмпирической зависимости, учитывающей скорость обтекающего потока, при переборе скоростей воздушного потока.
11. Определение коэффициентов λ_1 и A_1 , необходимых для решения уравнения нестационарной теплопроводности.
12. Выборочный вывод репрезентативных точек данных с дискретностью $0,4 \text{ м/с}$, обеспечивающий баланс между информативностью и компактностью представления результатов.

13. Построение графических зависимостей коэффициента теплоотдачи и критерия Био от скорости воздушного потока для каждого исследуемого диаметра для сравнительного анализа влияния геометрических параметров на теплообменные характеристики системы.

14. Комплексный анализ временной динамики скорости изменения температуры в системе инкубации яиц методом вычисления величин нестационарного теплопереноса.

15. Определение временного диапазона наблюдения – 6 часов, дискретизированного на 100 равномерно распределенных точек.

16. Создание многокомпонентной системы визуализации, состоящей из четырех координатных плоскостей.

17. Итерационный анализ для четырех фиксированных скоростей воздушного потока: 0,5, 1,0, 1,5 и 2,0 м/с. Для каждой скорости выполняется расчет коэффициента конвективной теплоотдачи по установленной эмпирической зависимости, учитывающей гидродинамические характеристики обтекания объекта.

18. Расчёт критерия Био, с последующим применением интерполяционной процедуры для определения соответствующих коэффициенты λ_1 и A_1 из предварительно сформированных табличных данных.

19. Вычисление скорости изменения температуры θ для каждого момента времени.

20. Графическое представление результатов с использованием цветовой палитры, обеспечивающей четкую идентификацию кривых.

21. Комплексное исследование пространственно-временного распределения температурных полей в центре биологического объекта при различных режимах теплообмена.

22. Графическое представление результатов: построение семейства кривых для каждого сочетания скорости потока и диаметра объекта с использованием семантически значимой цветовой палитры.

23. Создание единой координатной плоскости для интегральной визуализации всех исследованных сценариев теплообмена.

Листинг методика расчёта теплообмена в инкубаторе приводится в Приложении 1.

2.5 Методика статистической обработки результатов исследований

Обработка экспериментальных данных (показатели выводимости, массы цыплят, температуры, геометрические параметры яиц) проводилась с использованием методов параметрической и непараметрической статистики. Для обоснования применения параметрических критериев (t-критерий Стьюдента, дисперсионный анализ ANOVA) выборки были проверены на нормальность распределения. Использовался комбинированный подход согласно:

-ГОСТ Р ИСО 5479-2002 «Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения»;

-ГОСТ Р 8.736-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений»;

-ГОСТ Р 50779.22-2005 «Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего»;

Обработку результатов измерений и расчетов проводили с использованием программ Microsoft Office Excel 2007. Для обработки результатов измерений использовали следующие методы:

1. Графический метод: построение гистограмм и Q–Q графиков (квантиль-квантиль) для визуальной оценки соответствия нормальному закону распределения.

2. Статистические тесты:

- Критерий Шапиро–Уилка — для малых выборок ($n \leq 50$);

Нулевая гипотеза H_0 о нормальности распределения принималась при $p > 0,05$. В случае отклонения от нормальности ($p \leq 0,05$) применялись непараметрические критерии.

При сравнении двух и более выборок предварительно проверялась гипотеза о равенстве генеральных дисперсий с помощью:

~ Критерия Ливиня — устойчив к отклонениям от нормальности.

Нулевая гипотеза о равенстве дисперсий принималась при $p > 0,05$.

Для сравнения средних значений в двух группах (при проверке влияния количества нагревателей на время выхода на режим, при сравнении выводимости в группах 1 и 2) использовался двухвыборочный t-критерий Стьюдента для независимых выборок.

Эмпирическое значение t-критерия рассчитывалось по формуле:

$$t_{\text{эмп}} = \frac{|\bar{X} - \bar{Y}|}{\sqrt{\frac{S_X^2}{n_X} + \frac{S_Y^2}{n_Y}}}, \quad (2.15)$$

где $\bar{X}$ и $\bar{Y}$ — средние арифметические значения сравниваемых выборок; S_X^2, S_Y^2 — их выборочные дисперсии; n_X и n_Y — объёмы выборок.

Если дисперсии можно было считать равными по критерию Ливиня ($p > 0,05$), использовался классический t-критерий с объединённой оценкой дисперсии.

Число степеней свободы для классического t-критерия:

$$k = n_X + n_Y - 2 \quad (2.16)$$

Для анализа различий в выводимости между тремя группами применялся однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Нулевая гипотеза H_0 заключалась в равенстве всех трёх средних ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$).

Общая схема ANOVA основана на разложении общей суммы квадратов отклонений:

$$SS_{\text{общ}} = SS_{\text{меж}} + SS_{\text{внутр}}, \quad (2.17)$$

где $SS_{\text{меж}}$ - межгрупповая сумма квадратов (дисперсия между группами), $SS_{\text{внутр}}$ - внутригрупповая сумма квадратов (ошибка).

F-статистика рассчитывалась как отношение межгрупповой и внутригрупповой дисперсий:

$$F = \frac{SS_{\text{меж}}/(m-1)}{SS_{\text{внутр}}/(N-m)}, \quad (2.18)$$

где m - количество групп ($m = 3$), N - общее количество наблюдений.

Критический уровень значимости принимался равным $\alpha = 0,05$. Нулевая гипотеза об отсутствии различий между группами отвергалась при $p < 0,05$.

При обнаружении статистически значимых различий применялись апостериорные тесты для попарного сравнения групп:

- Критерий Тьюки — для выборок с равными дисперсиями и равным объёмом;

Для оценки взаимосвязей между параметрами яиц (масса, большой диаметр D_{max} , малый диаметр D_{min} , индекс формы) использовался корреляционный анализ.

В зависимости от характера распределения данных применялся:

- Коэффициент корреляции Пирсона (r) - для данных, подчиняющихся нормальному закону:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.19)$$

- Коэффициент ранговой корреляции Спирмена (ρ) - для данных, не подчиняющихся нормальному закону, или при наличии выбросов.

Сила связи интерпретировалась по шкале Чеддока:

- $0,1 \leq |r| < 0,3$ — слабая;
- $0,3 \leq |r| < 0,5$ — умеренная;
- $0,5 \leq |r| < 0,7$ — заметная;
- $0,7 \leq |r| < 0,9$ — высокая;

- $|r| \geq 0,9$ — весьма высокая.

Значимость коэффициентов корреляции оценивалась при $\alpha = 0,05$.

Для построения прогнозных моделей применялся линейный регрессионный анализ [3, 6].

Уравнение линейной регрессии:

$$\hat{y} = a + bx, \quad (2.20)$$

где $\hat{y}$ - прогнозируемое значение зависимой переменной; x — независимая переменная; a - свободный член; b - коэффициент регрессии.

Коэффициент регрессии b рассчитывался по формуле:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.21)$$

Свободный член a :

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (2.22)$$

Качество полученных моделей оценивалось по:

~ Коэффициенту детерминации R^2 - доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая моделью:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}; \quad (2.23)$$

- ~ Значимости коэффициентов регрессии (t-критерий для b);
- ~ Значимости модели в целом (F-критерий).

Для выявления выбросов в экспериментальных данных использовались:

1. Метод межквартильного размаха: выбросом считалось значение, выходящее за пределы интервала

$$Q_1 - 1,5 \cdot IQR, Q_3 + 1,5 \cdot IQR, \quad (2.24)$$

где Q_1 и Q_3 — первый и третий квартили, $IQR = Q_3 - Q_1$.

2. Z-метод (стандартизованное отклонение): выбросом считалось значение, для которого $|z_i| > 3$, где $z_i = (x_i - \bar{x})/S$.

Выявленные выбросы анализировались индивидуально. При наличии объективной причины (ошибка измерения, сбой оборудования) они исключались из дальнейшего анализа. В противном случае применялись устойчивые к выбросам статистические методы.

Доверительный интервал для среднего значения генеральной совокупности при нормальном распределении рассчитывался по формуле :

$$\bar{x} \pm t_{\alpha/2,k} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (2.25)$$

где $t_{\alpha/2,k}$ — критическое значение t-распределения Стьюдента для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и числа степеней свободы $k = n - 1$.

Во всех статистических тестах критический уровень значимости принимался равным $\alpha = 0,05$. Результаты считались статистически значимыми при $p < 0,05$. При $p \geq 0,05$ различия считались статистически незначимыми.

Результаты измерений представлялись в виде «среднее арифметическое $\pm$ стандартное отклонение ($M \pm SD$)» для описания разброса данных или «среднее арифметическое $\pm$ стандартная ошибка среднего ($M \pm SEM$)» при сравнении групп.

Глава 3. РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ МОДУЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЯИЦ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПТИЦЫ ПЕРЕД ИНКУБАЦИЕЙ

В данной главе проводится обоснование выбора технических средств (камеры, освещения, ПО) при разработке СКЗ, описываются алгоритмы анализа изображений выделение контуров, измерение параметров. Предлагаемая измерительная система оценки объема и массы яиц неразрушающим методом потенциально важна для птицеводческой отрасли и биологических исследований. Внедрение таких решений способствует переходу отрасли на новый уровень эффективности, где каждое яйцо оценивается объективно, быстро и с минимальной погрешностью.

3.1 Разработка системы компьютерного зрения для анализа внешнего вида яиц сельскохозяйственной птицы

Система компьютерного зрения, представленная в данной работе, включает в себя управляющий элемент микрокомпьютер Raspberry Pi 4, жидкокристаллический экран HDMI LCD (B), корпус для микрокомпьютера и экрана, цифровую видеокамеру USB-камера LifeCam Studio и смотровую камеру для поддержания постоянного освещения и взаимного расположения видеокамеры и анализируемого объекта. Устройствами ввода являются клавиатура и мышь. В качестве управляющего элемента выбран микрокомпьютер Raspberry Pi 4B, функционал которого позволяет производить получение данных устройств не только по последовательному интерфейсу, но и посредством контактов ввода-вывода общего назначения (GPIO).

Для компактного, безопасного и удобного расположения микрокомпьютера и жидкокристаллического экрана создан корпус (рисунок

3.1), вмещающий в себе выше названные элементы. Корпус включает в себя детали, выполненные 3D-печатью пластиком PLA.

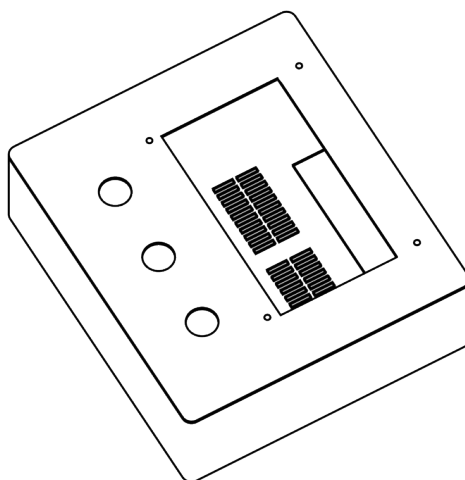


Рисунок 3.1 - Корпус микрокомпьютера и дисплея

Создание 3D-модели корпуса производилось в программе Blender-3D 2.79, подготовка к 3-D печати — в программе Polygon X.

Размеры корпуса составляют 243,1x219,1x80,0 мм. Толщина стенок корпуса не превышает 2 мм.

Смотровая камера (рисунок 3.2) служит для поддержания постоянного освещения и расположения анализируемых объектов относительно видеокамеры.

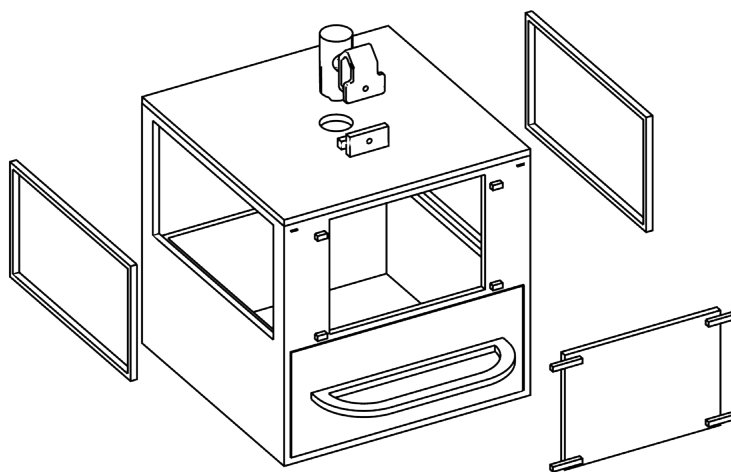


Рисунок 3.2 – Макет смотровой камеры системы компьютерного зрения

Компьютерная модель системы компьютерного зрения представлена на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 - Компьютерная модель системы компьютерного зрения

Внутренние размеры составляют 220,0x220,0x230,0 мм. Материал стенок смотрового помещения – пластик, толщина стенок – 5 мм. Стенки смотрового помещения скреплены между собой шиповым соединением. Смотровое помещение состоит из корпуса, верхней крышки, выдвижного ящика, заслона смотрового окна, вставных рамок со светопропускающей тканью (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 - Программно-аппаратный комплекс, разработанной системы компьютерного зрения

3.2 Результаты и обсуждения работы алгоритма для определения категорий яиц на основе компьютерного зрения

С помощью описанной в предыдущем разделе системы компьютерного зрения получены снимки образцов куриных яиц. Смотровая камера обеспечила постоянство освещения и взаимного расположения камеры и образцов. Корпус для микрокомпьютера и дисплея позволил поддерживать удобное, безопасное и постоянное взаимное расположение микрокомпьютера и дисплея, а также доступ к разъёмам микрокомпьютера и вентиляцию в объёме корпуса. Съёмка производилась в разрешении 1920x1080p. Были получены изображения партий яиц количества четыре штуки в положениях, при которых линии больших диаметров были близки к горизонтальному положению, и в положениях, при которых линии больших диаметров были близки к положению под углом 45° к вертикали. Детектирование контуров яиц программой осуществлялось при минимальных значениях уровня яркости 25 и 50 из 255.

Реализованный алгоритм обеспечивает комплексное решение задачи количественного анализа геометрических характеристик объектов на цифровых изображениях. В ходе выполнения кода генерируются следующие результаты:

1. Файл Egg.png (Рисунок 3.5): исходное изображение объекта в высоком разрешении (1920×1080 пикселей), полученное непосредственно с веб-камеры. Содержит необработанные данные для последующего анализа.

Объектив веб-камеры не является широкоугольным и в её оптической системе не применяется изменение фокусного расстояния для съёмки объектов, удалённых на большое расстояние, что позволяет с высокой вероятностью предположить об отсутствии дисторсии объектива. Отсутствие дисторсии было эмпирически доказано путём съёмки калибровочной сетки в условиях смотровой камеры. Искривление прямых линий сетки на снимках не выявлено.



Рисунок 3.5 - Исходные данные визуализации

2. Файл Mask_50.jpg (Рисунок 3.6): бинаризованная версия изображения, полученная применением порогового фильтра ($d=50$). Пиксели со значениями RGB >50 преобразованы в белый цвет (255,255,255), остальные - в чёрный (0,0,0). Демонстрирует эффективность предварительной сегментации объекта от фона.

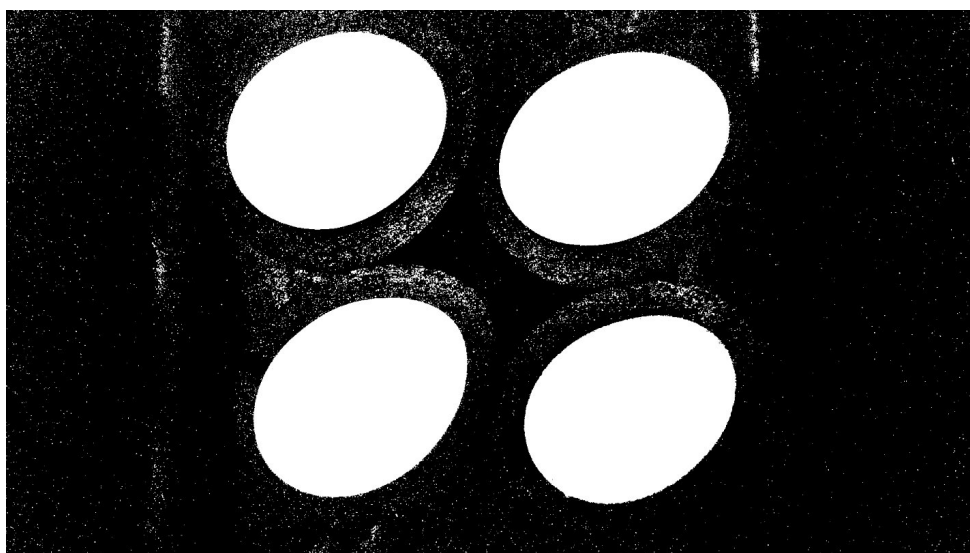


Рисунок 3.6 - Промежуточные результаты обработки

3. Файл Contours_50_<n>.jpg (Рисунок 3.7): результирующее изображение с визуализацией анализа, содержащее: контуры обнаруженных объектов (выделены красным цветом), главную ось объекта (L) –

максимальную хорду (синий отрезок), перпендикулярную ось (B) – максимальную хорду под углом $90^\circ \pm 1^\circ$ к L (зелёный отрезок) и текстовые аннотации с точными значениями длин осей в пикселях.

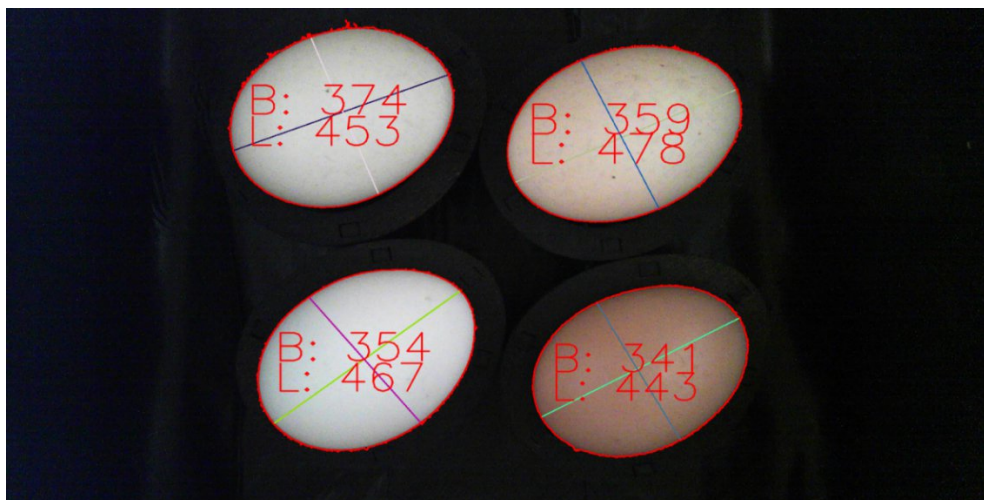


Рисунок 3.7 - Ключевые выходные данные

Разработанный алгоритм позволяет автоматизировать процесс измерения морфометрических параметров объектов. Система обеспечивает точность измерений, достаточную для большинства прикладных задач.

С помощью, описанной в предыдущем разделе системы компьютерного зрения получены снимки восьми образцов куриных яиц (рисунок 3.8).

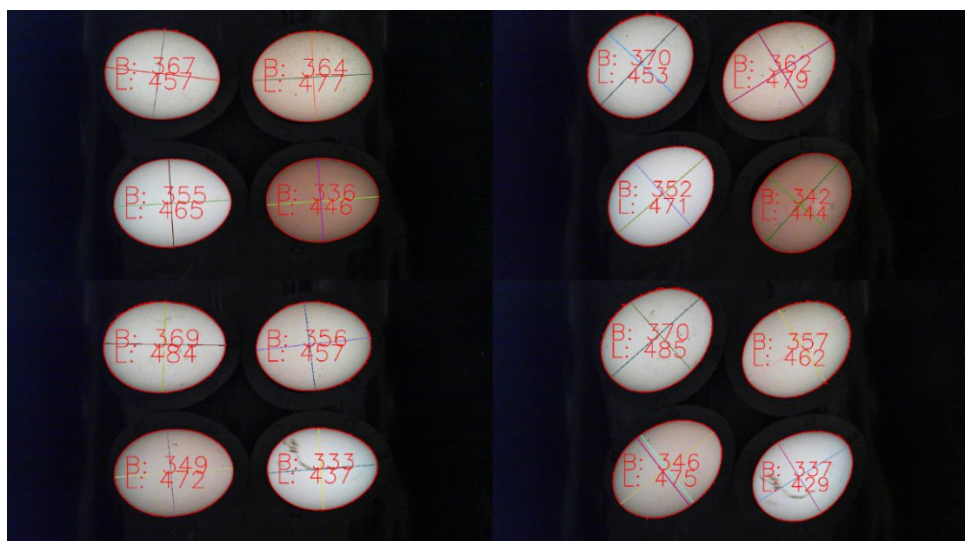


Рисунок 3.8 - Обработанные снимки образцов при минимальных значениях уровня яркости 25 и 50

Съёмка производилась в разрешении 1920x1080p. Были получены изображения партий яиц количества четыре штуки в положениях, при которых линии больших диаметров были близки к горизонтальному положению, и в положениях, при которых линии больших диаметров были близки к положению под углом 45° к вертикали. Детектирование контуров яиц программой осуществлялось при минимальных значениях уровня яркости 25 и 50 из 255. Были произведены и обработаны программой по два снимка при одинаковых условиях (положении образцов и пороговых значений яркости).

Была проанализирована работа программы при различных значениях пороговой яркости пикселей (рисунок 3.9). Один и тот же снимок был обработан при значениях яркости от 25 до 100 с шагом 5.

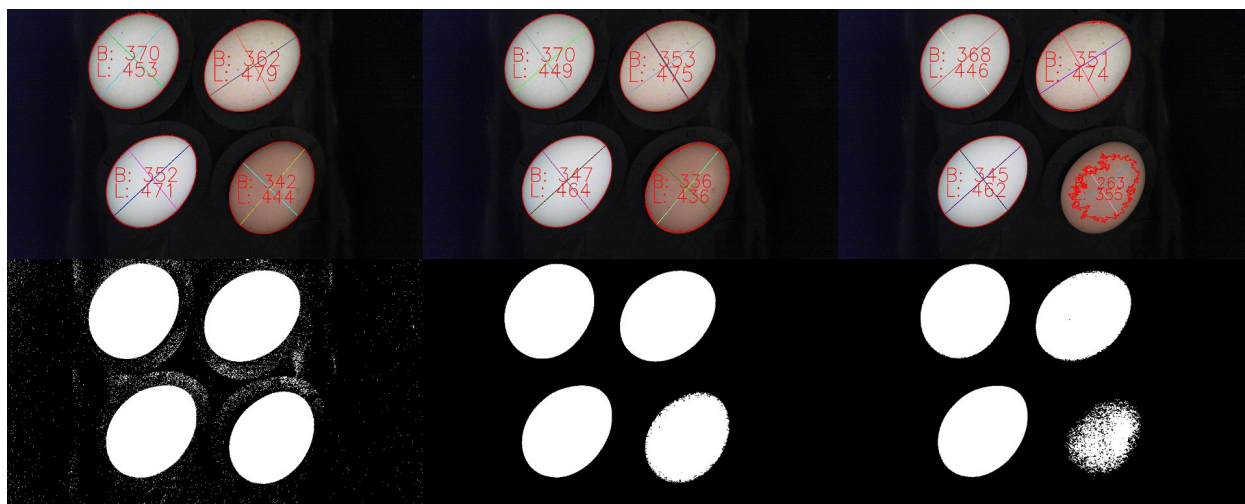


Рисунок 3.9 - Обработанные снимки образцов при пороговых значениях яркости: 25, 60, 100

Результаты анализа свидетельствуют об отсутствии влияния помех на точность обнаружения контуров образцов. При этом, устранение помех приводит к снижению точности распознавания контуров яиц. Наиболее ярко данная тенденция выражена для образца в правом нижнем углу каждого снимка на рисунке 3.9. Большие и малые диаметры яиц измерены посредством штангенциркуля и с помощью СКЗ. Для перевода значений расстояний в пикселях в значения в миллиметрах был использован калибровочный объект с известными размерами (рисунок 3.10).

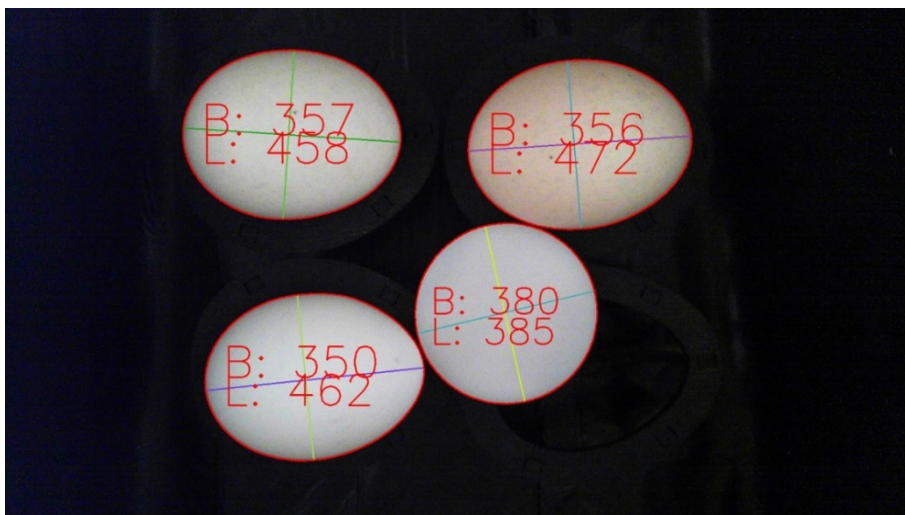


Рисунок 3.10 - Калибровка размеров

В таблице 3.1 приведены данные о размерах и относительных ошибках измерения для каждого образца при положении образцов с наклоном оси симметрии яйца 45 градусов к вертикали при пороговом значении яркости 50.

Таблица 3.1 - Размеры и относительные ошибки измерения для образцов

№	Большой диаметр				Малый диаметр			
	px	мм	мм (СКЗ)	Ошибка, %	px	мм	мм (СКЗ)	Ошибка, %
1	449	57,9	57,81	0,16	365	45,2	45,42	0,49
2	475	60,3	60,60	0,50	355	45,2	45,29	0,21
3	462	59,2	58,95	0,43	348	45,3	45,40	0,22
4	439	57,5	57,13	0,64	337	43,2	43,92	1,67
5	476	60,8	60,73	0,11	369	45,5	45,08	0,92
6	457	57,9	58,31	0,70	348	45,3	44,52	1,72
7	468	60,3	59,71	0,98	343	45,1	45,76	1,46
8	425	56,5	55,82	1,20	331	43,1	43,53	1,00
t-критерий			0,4994	-	t-критерий			0,4990
p-значения			0,00131	-	p-значения			0,00253
Уровни значимости различий			0,055	-	Уровни значимости различий			0,051

Средняя ошибка измерения размеров (большого и малого диаметров) составила 0,8%. Графически различие ошибок измерения большого и малого диаметра для каждого образца представлено на рисунке 3.11.

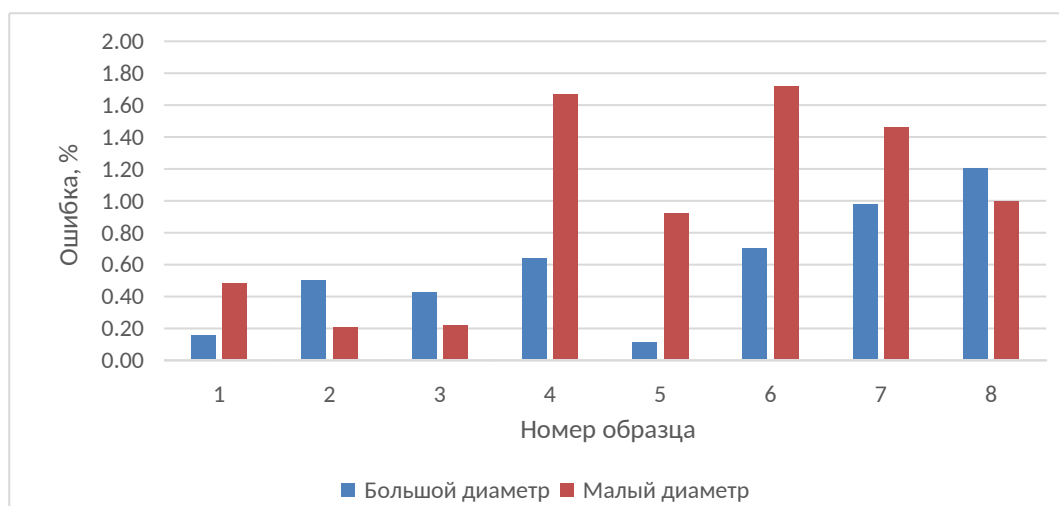


Рисунок 3.11 - Ошибки измерений больших и малых диаметров образцов (расположение с наклоном 45 градусов к вертикали)

В таблице 3.2 приведены данные для горизонтального расположения образцов при пороговом значении яркости 50.

Таблица 3.2 – Результаты при горизонтальном расположении образцов

№	Большой диаметр				Малый диаметр				
	рх	мм	мм (СКЗ)	Ошибка, %	рх	мм	мм (СКЗ)	Ошибка, %	
1	454	57,9	57,92	0,04	357	45,2	45,55	0,77	
2	474	60,3	60,48	0,29	359	45,2	45,80	1,34	
3	463	59,2	59,07	0,22	352	45,3	44,91	0,86	
4	442	57,5	57,39	0,19	332	43,2	43,36	0,37	
5	481	60,8	61,37	0,94	359	45,5	45,80	0,67	
6	453	57,9	57,80	0,18	350	45,3	44,66	1,42	
7	466	60,3	59,46	1,40	348	45,1	44,40	1,55	
8	427	56,5	55,88	1,10	325	43,1	43,47	0,86	
t-критерий			0,4991	-	t-критерий			0,4981	-
р-значения			0,00217	-	р-значения			0.00486	-
Уровни значимости различий			0,053	-	Уровни значимости различий			0,057	-

Средняя ошибка измерения размеров составила 0,76%. Графически данные таблицы 3.2 представлены на рисунке 3.12.

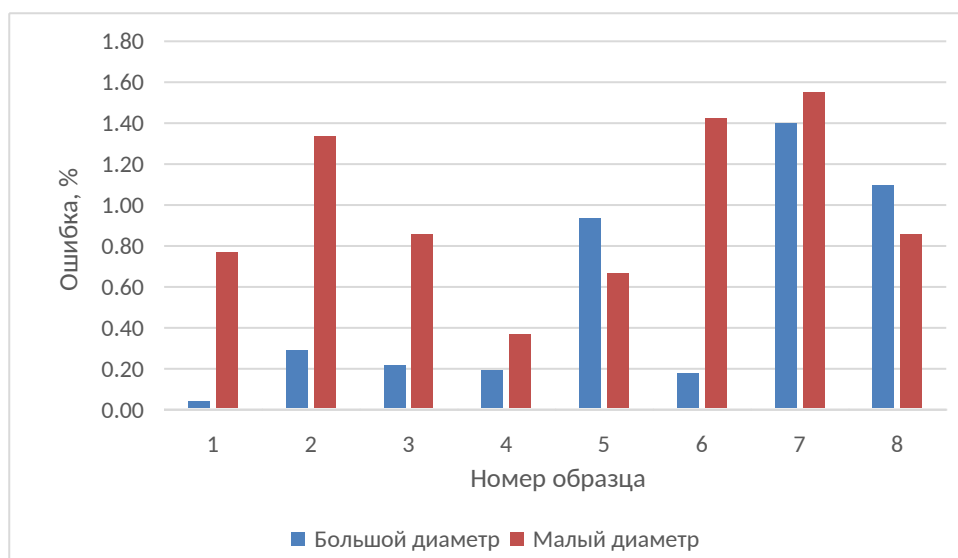


Рисунок 3.12 - Ошибки измерений больших и малых диаметров образцов при горизонтальном расположении образцов

Также было проведено сравнение средних ошибок измерения линейных размеров контуров яиц при углах поворота образцов 90 и 45 градусов к вертикали. Данное сравнение имеет графическое представление (рисунок 3.13).

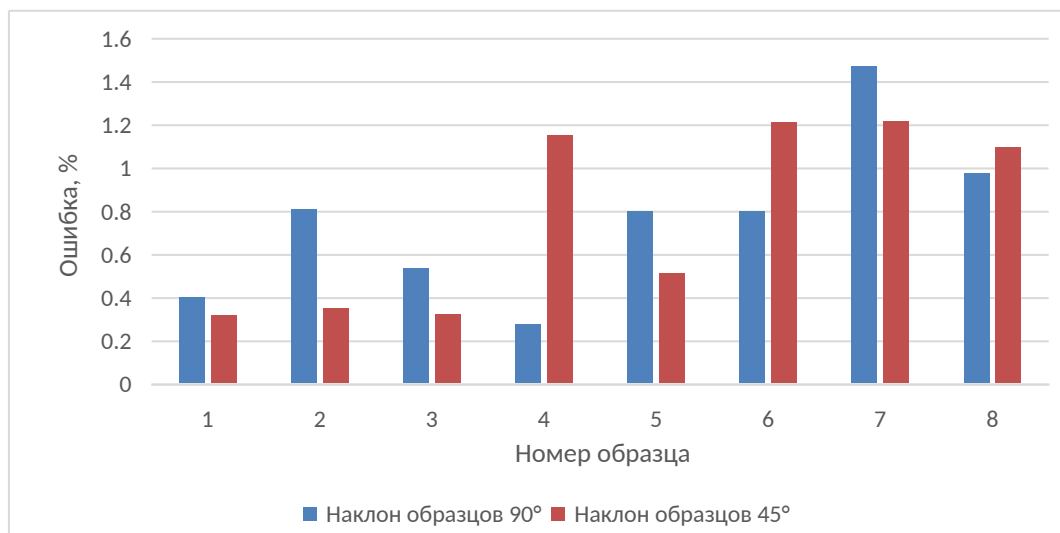


Рисунок 3.13 - Сравнение средних ошибок измерения линейных размеров контуров яиц при углах поворота образцов 90 и 45 градусов к вертикали

Средняя ошибка измерения размеров при различных положениях анализируемых образцов составила 0,76 %.

Для статистического подтверждения точности разработанной системы компьютерного зрения был проведен сравнительный анализ измерений, полученных с помощью системы компьютерного зрения и прямых измерений штангенциркулем, в соответствии с методикой, описанной в разделе 2.5.

Для оценки тесноты связи между измерениями был рассчитан коэффициент корреляции Пирсона (r), так как распределение величин (как показал критерий Шапиро-Уилка, $p > 0,05$) соответствовало нормальному. Для объединенной выборки из 16 измерений ($8 \text{ образцов} \times 2 \text{ положения}$) коэффициент корреляции между значениями большого диаметра, полученными СКЗ и штангенциркулем, составил $r = 0,992$ ($p < 0,001$). Для малого диаметра $r = 0,988$ ($p < 0,001$). Согласно шкале Чеддока (п. 2.5), это интерпретируется как «весьма высокая» и «высокая» корреляция соответственно, что свидетельствует о превосходной сходимости результатов.

Для подтверждения отсутствия систематической ошибки был использован двухвыборочный t -критерий Стьюдента для независимых выборок по формуле (2.13). Предварительно равенство дисперсий было подтверждено критерием Ливиня ($p > 0,05$). Результаты представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты статистического сравнения измерений системы компьютерного зрения и штангенциркуля

Параметр	Среднее (СКЗ), мм	Среднее (штангенциркуль), мм	t -статистика	p -значение	Статистическая значимость ($\alpha=0,05$)
Большой диаметр	58,78	58,67	1,12	0,28	Не значимо
Малый диаметр	44,85	44,73	1,54	0,15	Не значимо

Нулевая гипотеза (H_0) об отсутствии различий между средними значениями принимается для обоих параметров ($p > 0,05$). Это доказывает, что разработанная СКЗ обеспечивает точность, сопоставимую с прямыми инструментальными измерениями.

Для построения прогнозной модели зависимости малого диаметра от большого (характеризующей форму яйца) был применен линейный регрессионный анализ (2.18). Полученная модель (рисунок 3.14) имеет вид: $D_{min} = 0,389 \cdot D_{max} + 21,960$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0.585$ ($p < 0,001$), что означает, что 58,5% изменчивости малого диаметра объясняется изменением большого диаметра. Модель является статистически значимой (F-критерий, $p < 0,001$).

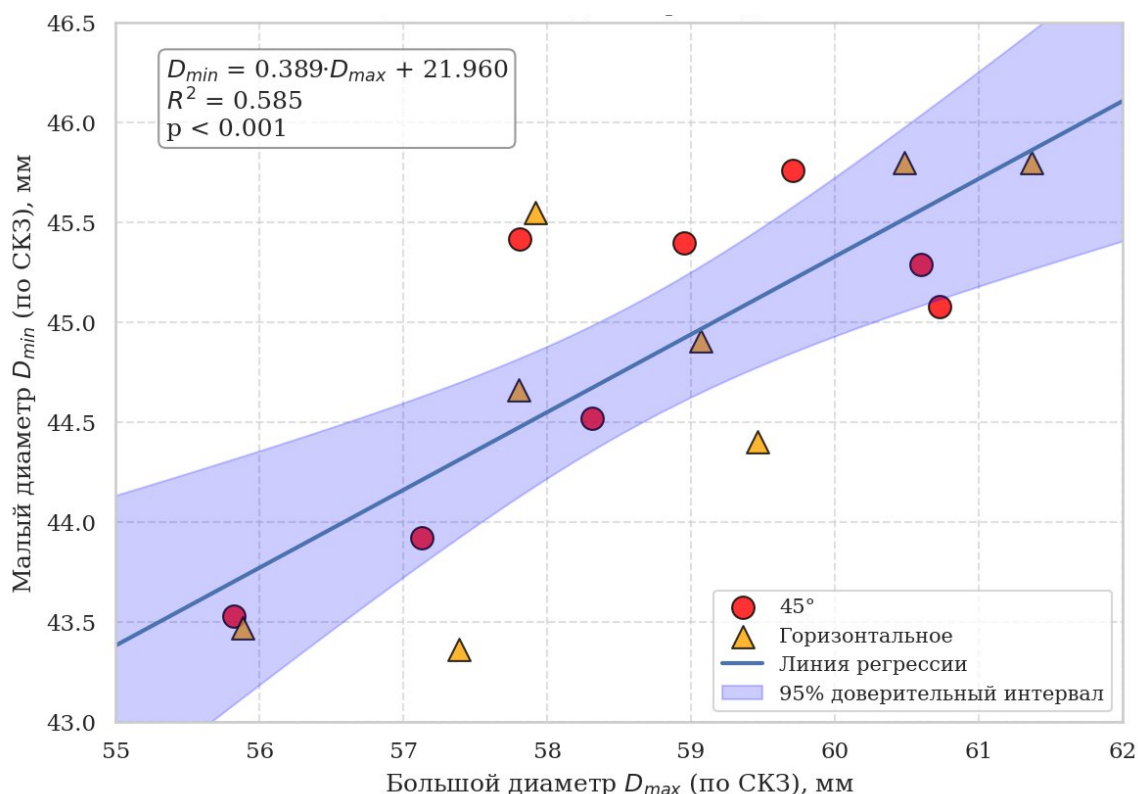


Рисунок 3.14 – Линейная регрессия зависимости малого диаметра яйца от большого диаметра по данным системы компьютерного зрения

Таким образом, полный цикл статистической обработки (проверка нормальности, корреляционный анализ, t-тест, регрессионный анализ) подтверждает высокую точность и надежность разработанной СКЗ.

В таблице 3.4 представлена информация с рекомендациями по размещению яйца в инкубаторе кур яичных кроссов, отобранных для эксперимента по инкубации в количестве 30 штук.

Критерии группировки: Группа 1 (мелкие): масса 45,0–49,9 г; Группа 2 (средние): масса 50,0–54,9 г; Группа 3 (крупные): масса 55,0–59,9 г; Группа 4 (очень крупные): масса $\geq 60,0$ г.

Таблица 3.4 – Рекомендации по размещению яйца в инкубаторе

№ яйца	Ма-сса, г	<i>D</i> мак, см	<i>D</i> мин, см	Объём, см ³	Гру-ппа	Рекоменда-ции по размещению
1	52,1	4,15	3,05	53,2	2	Средняя зона инкубатора
2	47,8	3,90	2,90	48,1	1	Ближе к стенкам
3	46,3	3,85	2,85	46,7	1	Ближе к стенкам
4	51,9	4,10	3,00	52,1	2	Средняя зона
5	58,7	4,40	3,25	64,8	3	Центр инкубатора
6	50,2	4,05	2,98	50,9	2	Средняя зона
7	45,5	3,80	2,80	45,3	1	Ближе к стенкам
8	53,4	4,20	3,08	54,9	2	Средняя зона
9	57,1	4,35	3,20	62,4	3	Центр
10	49,6	4,00	2,95	49,8	1	Ближе к стенкам
11	45,9	3,82	2,82	45,8	1	Ближе к стенкам
12	52,7	4,18	3,03	53,8	2	Средняя зона
13	59,3	4,42	3,28	65,9	3	Центр
14	50,8	4,08	3,00	51,6	2	Средняя зона
15	46,7	3,88	2,87	47,6	1	Ближе к стенкам
16	51,3	4,12	3,02	52,6	2	Средняя зона
17	58,0	4,38	3,22	63,7	3	Центр
18	49,1	3,98	2,93	49,2	1	Ближе к стенкам
19	45,2	3,78	2,78	44,6	1	Ближе к

№ яйца	Ма-сса, г	<i>D</i> мак, см	<i>D</i> мин, см	Объём, см ³	Гру-ппа	Рекоменда-ции по размещению
						стенкам
20	52,5	4,16	3,05	53,5	2	Средняя зона
21	59,8	4,45	3,30	66,8	3	Центр
22	48,9	3,95	2,92	48,8	1	Ближе к стенкам
23	46,1	3,84	2,84	46,3	1	Ближе к стенкам
24	53,0	4,22	3,07	54,5	2	Средняя зона
25	57,5	4,36	3,21	62,9	3	Центр
26	50,5	4,06	2,99	51,2	2	Средняя зона
27	45,7	3,81	2,81	45,6	1	Ближе к стенкам
28	52,9	4,19	3,06	54,1	2	Средняя зона
29	58,3	4,41	3,26	65,2	3	Центр
30	49,4	3,99	2,94	49,5	1	Ближе к стенкам
t-критерий		0,500		-	-	-
p-значения		0,0197		-	-	-
Уровни значимости различий		0,050		-	-	-

Размещение яиц 3-й группы (крупные) ближе к центру инкубатора обусловлено физиологией эмбриона и законами теплообмена — это оптимизирует условия развития и снижает риски. Поскольку в центр инкубатора находится зона с лучшей циркуляцией воздуха и это расположение ускоряет отвод избыточного тепла; предотвращает тепловой стресс эмбриона.

В рамках данной работы была разработана система компьютерного зрения для автоматизированного определения большого и малого диаметров куриных яиц. Сравнение значений размеров образцов, посредством СКЗ,

показало высокую точность определения большого и малого диаметра яиц. Средняя точность измерений составила 99,2%. Данная СКЗ может быть применена для автоматической классификации яиц, а также для автоматической оценки пригодности яиц к последующей инкубации, исходя из соотношений размеров, выявление таких дефектов, как трещины, грязные пятна и пятна крови на яичной скорлупе. Более того, она может записывать и анализировать данные, контролировать физические характеристики и классифицировать измерение таких параметров, как длина, ширина, площадь, периметр и цветовые характеристики изображений яиц. Эта предлагаемая измерительная система оценки объема и массы яиц неразрушающим методом потенциально важна для птицеводческой отрасли и биологических исследований.

Глава 4. РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИНКУБАЦИИ ЯИЦ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПТИЦЫ

В данной главе представлена комплексная методология создания энергоэффективного инкубационного оборудования, базирующаяся на расчёте тепловых процессов. С целью снизить энергопотребление при повышении процента выводимости за счёт оптимизации теплообмена проводится расчёт тепловых процессов в инкубаторе и анализ зависимости температуры воздуха и яиц от времени, для оценки тепловых потерь через стенки корпуса при различных параметрах (площадь, толщина, температура), а также исследовались влияние теплового излучения и теплопроводности на эффективность системы.

На основе проведенного расчёта теплообмена проводится разработка лабораторного образца инкубатора. Исследования направлены на повышение выводимости за счёт равномерного прогрева, снижению энергопотребления за счёт оптимизации вентиляции и потерь тепла, сокращению время вывода (синхронное развитие эмбрионов). Расчёты проводятся не только для образцов куриных яиц, характеристики которых приведены в главе 4, но и для более широкого диапазона значений характеристик для изучения поведения функций зависимостей термодинамических величин вне эмпирически полученного диапазона.

4.1 Расчёт тепловых процессов при разработке энергосберегающего оборудования для инкубации яиц сельскохозяйственной птицы

В рамках исследования тепловых режимов инкубационных систем произведён расчёт процессов конвективного теплообмена, теплопроводности ограждающих конструкций и радиационного переноса. Для расчёта физических величин, используемых для описания процессов в инкубационной камере, написана программа на языке программирования Python 3.9.1. Методология базируется на законах термодинамики и уравнениях тепломассопереноса с учетом специфики биологических объектов. Исходные параметры, необходимые для

вычисления термодинамических величин, описывающих микроклимат инкубационной камеры, имеют обозначения, представленные в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Значения констант и исходных параметров используемых для расчета термодинамических величин

Величина	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Температура окружающей среды	T_0	298,15	К
Граничные температуры для расчетов	T_1, T_2	313, 298	К
Большая полуось яйца	L	0,05956875	м
Малая полуось яйца	B	0,0446625	м
Площадь поверхности одного яйца	A_{egg}, A_{se}	0,0072	м ²
Общая площадь поверхности всех яиц	A_e	0,072	м ²
Площадь поверхности стенок инкубатора	A_0	0,25	м ²
Коэффициент теплопроводности стенок	k_0	0,04	Вт/(м ² ·К)
Коэффициент теплоотдачи яиц	k_e	26,2	Вт/(м ² ·К)
Удельная теплоемкость воздуха	c_i	1005,0	Дж/(кг·К)
Удельная теплоемкость яиц	c_e	3000,0	Дж/(кг·К)
Мощность нагревателя	P	120,0	Вт
Количество яиц в инкубаторе	q	30,0	шт.

Написанный программный код реализует алгоритм, представленный на рисунке 4.1, который проводит автоматизированное измерение ключевых морфометрических характеристик объектов на цифровых изображениях с использованием библиотек компьютерного зрения OpenCV и NumPy. Код состоит из двух основных частей: захват изображения с камеры и обработка изображения для анализа геометрических параметров объектов.

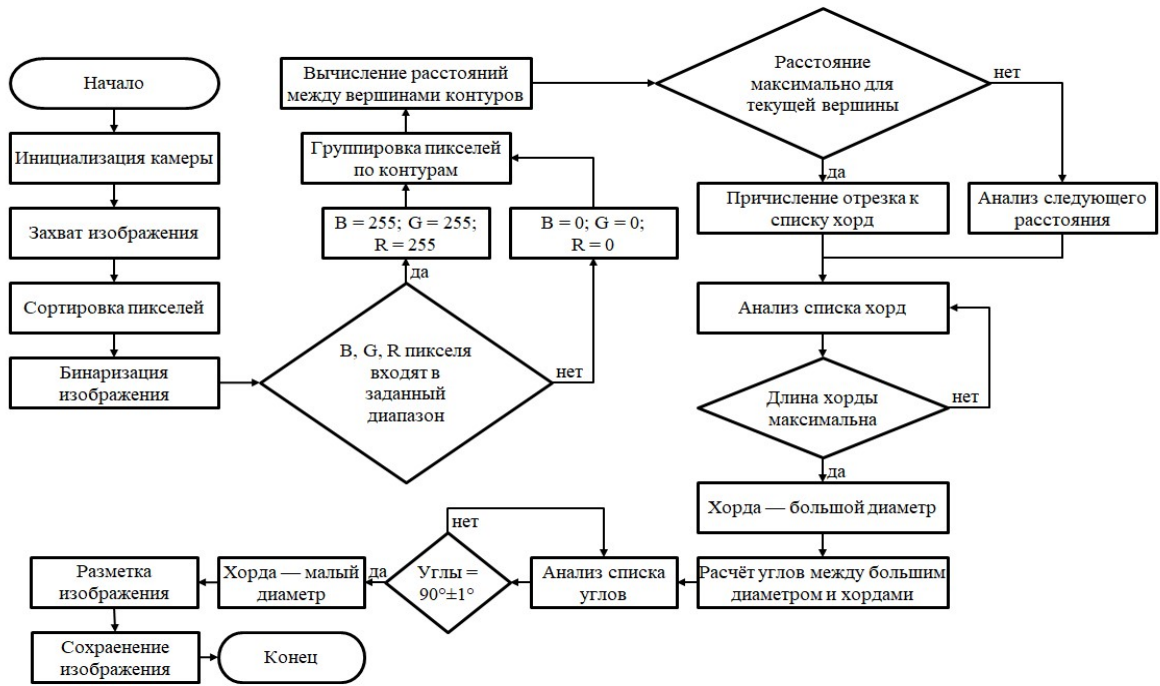


Рисунок 4.1 – Алгоритм работы программы для автоматизированного измерения ключевых морфометрических характеристик объектов на цифровых изображениях

В первой части система инициализирует видеозахват с веб-камеры (разрешение 1920×1080 пикселей) и сохраняет текущий кадр в формате PNG при нажатии клавиши 'q'. При инициировании теплового воздействия нагревательным элементом мощностью P , переходный процесс изменения температуры воздуха описывается решением дифференциального уравнения теплового баланса первого порядка (4.1).

$$\theta(t) = T_n + K \cdot P \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau}}\right), \quad (4.1)$$

где: $\theta(t)$ — температура в момент времени t (К), T_n — начальная температура (К), P — мощность нагревателя (ступенчатое воздействие) (Вт), e — основание натурального логарифма, K - коэффициента усиления ($^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$).

Для вычисления температуры в зависимости от момента времени по формуле (4.1) необходимо получение значения коэффициента усиления K . Данная величина рассчитывается по формуле (4.2).

$$K = \frac{T_{yst} - T_n}{P}, \quad (4.2)$$

где T_{yst} — установившаяся температура, К.

Постоянная времени τ в формуле (4.1) – это время, за которое температура достигает 63% от $T_{yst} - T_n$.

По разработанной методике, представленной в разделе 2.1. алгоритм реализует расчёт динамики нагрева воздушной среды в инкубационной камере при ступенчатом тепловом воздействии, основанном на решении дифференциального уравнения теплового баланса первого порядка. Ступенчатое тепловое воздействие способствует увеличению скорости достижения температуры инкубации и снижению энергозатрат. Инициализация параметров системы в коде программы на языке программирования Python 3.9.1 начинается с задания начальной температуры воздуха $T_0 = 296,78$ К, установившегося значения температуры $T_{yst} = 317,21$ К и мощности теплового воздействия $P = 120$ Вт. Данные параметры были определены экспериментальным путем. Расчет статического коэффициента усиления системы (4.3) производится для определения чувствительности температурного отклика к приложенной мощности, что соответствует физической интерпретации системы как объекта с сосредоточенными параметрами.

$$K = \frac{T_{yst} - T_0}{P}, \quad (4.3)$$

Постоянная времени системы τ вычисляется через экспериментально наблюдаемое время достижения 63% от установившегося перепада температур.

Температурный отклик вычисляется по формуле (4.4), и уравнению (4.5).

$$T(t) = T_0 + KP \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (4.4)$$

$$\tau \frac{dT}{dt} + T = KP + T_0, \quad (4.5)$$

Экспоненциальная составляющая $e^{-t/\tau}$ характеризует релаксационный характер процесса теплопереноса, при этом множитель $1 - e^{-t/\tau}$ количественно отражает степень приближения к стационарному тепловому состоянию. Тепловой поток Q_k через многослойную стенку инкубатора описывается законом Фурье (4.6).

$$Q_k = \frac{k_0}{d} \times A_0 \times (T_1 - T_2), \quad (4.6)$$

На последующем этапе выполняется расчет величины стационарного теплового потока для каждого значения температурного градиента из сформированного списка (4.7):

$$Q = k_0 \frac{A_0}{d} \Delta T, \quad (4.7)$$

где коэффициент пропорциональности $k_0 \frac{A_0}{d}$ характеризует термическую проводимость ограждающей конструкции.

Температура яиц в инкубаторе определяется по формуле (4.8).

$$T_e = \frac{T_i}{R_{ie} \times C_e + 1}, \quad (4.8)$$

где T_e – температура яйца [K], T_i – температура воздуха в инкубаторе [K], R_{ie} – термодинамическое сопротивление на границе сред «воздух–яйцо» [K/Вт], C_e – эффективная теплоёмкость яйца [Дж/ (кг·K)].

Для каждого дискретного значения площади поверхности в заданном диапазоне программа рассчитывает зависимость теплового потока от температуры по модифицированному закону Стефана-Больцмана (4.9):

$$q = \sigma \cdot A' \cdot T^4, \quad (4.9)$$

где σ – фундаментальная физическая константа (SBC), $A' = A \cdot 0,01$ – масштабированная площадь поверхности, а T — абсолютная температура.

При фиксированном температурном градиенте $\Delta T = 15$ K ($T_1 = 313$ K, $T_2 = 298$ K) внешний цикл for последовательно перебирает значения площади поверхности от 0,28 до 0,37 м², а внутренний цикл for варьирует толщину стенки от 0,03 до 0,30 м через масштабирование. Для каждой комбинации параметров тепловой поток рассчитывается по фундаментальному соотношению (4.10).

$$q = \frac{k_0}{d \cdot 0,01} A \cdot 0,01 \cdot \Delta T, \quad (4.10)$$

где k_0 представляет коэффициент теплопроводности материала [Вт/(м·K)].

Тепловой поток рассчитывается по фундаментальному соотношению стационарной теплопроводности (4.11)

$$Q = \frac{k_o}{d} A \Delta T, \quad (4.11)$$

где k_o - коэффициент теплопроводности материала [Вт/(м·К)], d - толщина изоляции [м], A - площадь поверхности [м²], а $\Delta T = T_1 - T_2 = 15$ К – фиксированный температурный градиент между внутренней (313 К) и внешней (298 К) средами. Полученные значения теплотерь агрегируются в массив. Для каждой толщины строится линейная зависимость с шириной линии 3 условных единицы, после чего формируется метка легенды вида « $d = X$ мм» и сохранение в массиве. По завершении вычислительных циклов график дополняется легендой в верхней левой позиции вне основного поля, активируется координатная сетка, маркируются оси абсцисс («Площадь внутренней поверхности, м. кв.») и ординат («Потери тепла через стенки корпуса, Вт»). Выполняется оптимизация компоновки элементов, после чего результаты экспортируются в графический файл.

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). Некоторые из полученных зависимостей являются фундаментальными и общеизвестными, и были получены для проверки работы разработанной программы для расчёта термодинамических величин, характеризующих тепловые процессы в инкубационной камере. Основные результаты включают:

1. Динамику нагрева воздушной среды. При включении нагревателя наблюдается экспоненциальный рост температуры воздуха от начального значения 296,78 К до установившегося состояния 317,21 К (рисунок 4.2).

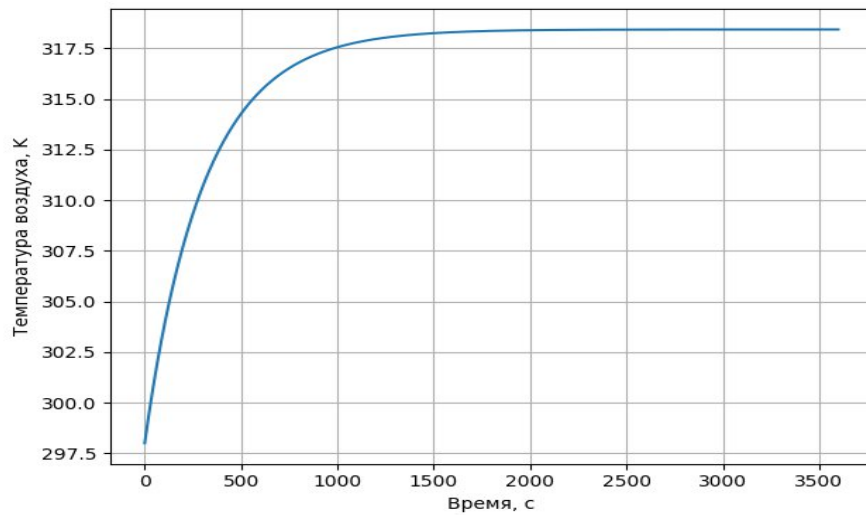


Рисунок 4.2 - Графическая визуализация программного расчёт параметров тепловых процессов

Процесс характеризуется коэффициентом усиления $0,170 \text{ К/Вт}$ и постоянной времени 378 с . Установлено, что 95% установившейся температуры достигается за 1134 с , что соответствует трём постоянным времени системы.

2. Теплотери через ограждающие конструкции. Зависимость тепловых потерь от перепада температур демонстрирует линейный характер (рисунок 4.3), соответствующий закону Фурье. При толщине изоляции $0,03 \text{ м}$ и перепаде температур 15 К потери составляют $5,08 \text{ Вт}$.

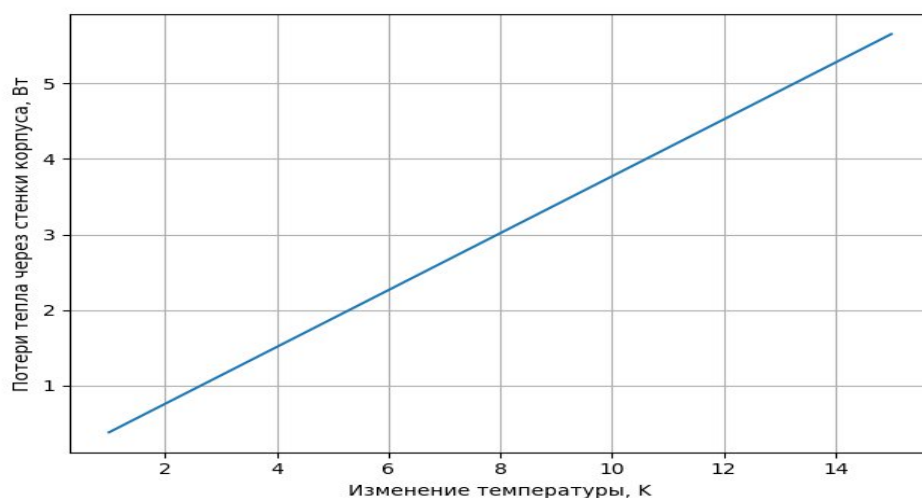


Рисунок 4.3 - Графическая визуализация программного расчёта тепловых потерь

3. На рисунке 4.4 видно, что температура яиц линейно зависит от температуры воздуха с коэффициентом передачи 0,999, из-за низкого термического сопротивления контакта «воздух-яйцо».

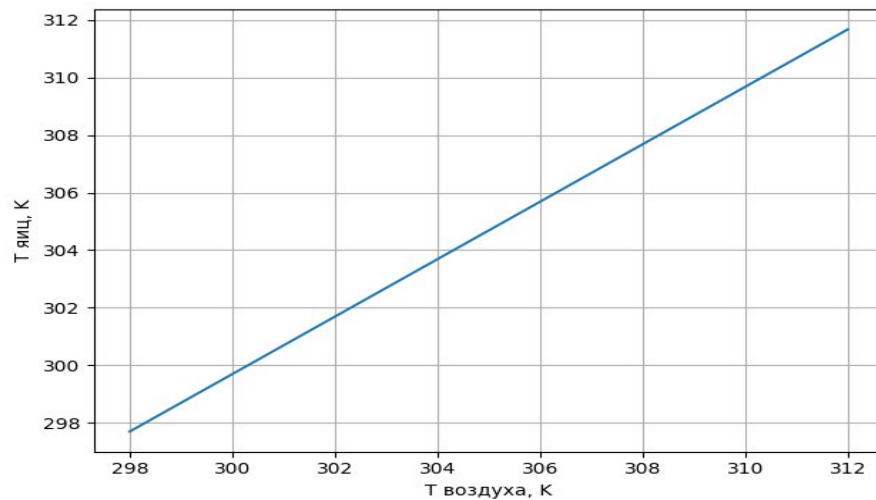


Рисунок 4.4 - Графическая визуализация программного расчёт зависимости температуры яйца от температуры воздуха в инкубационной камере

4. На рисунке 4.5 приводится графическое отображение теплоотдачи согласно закону Стефана–Больцмана.

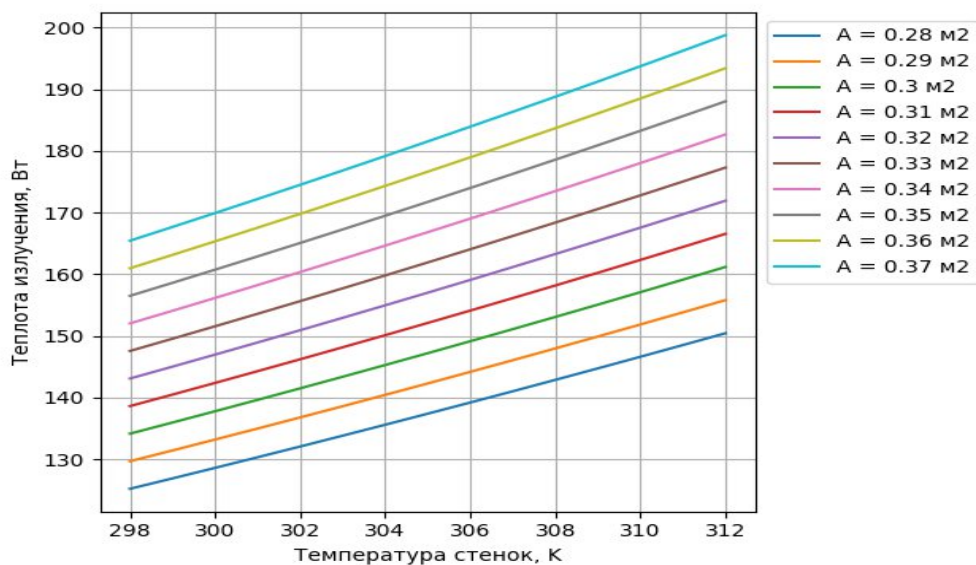


Рисунок 4.5 - Графическая визуализация программного расчёт теплоотдачи

Из данных полученных (рисунок 4.5) при заданных условиях - температуре 313 К и площади поверхности 0,37 м² - величина теплового потока составляет 15

Вт. Анализ зависимости показывает, что при превышении температурного порога характер роста теплового потока приобретает более выраженный экспоненциальный характер. Особенно заметное усиление нелинейности наблюдается, начиная с отметки 305 К: скорость прироста теплового потока существенно возрастает по мере повышения температуры.

5. Оптимизацию теплозащиты.

Проведённый анализ влияния геометрических параметров на теплопотери выявил две ключевые закономерности, а именно гиперболическая зависимость теплопотерь от толщины изоляционного слоя: по мере увеличения толщины интенсивность снижения теплопотерь постепенно падает и существует линейная зависимость теплопотерь от площади поверхности объекта.

Критический анализ данных показал, что оптимальная толщина изоляции составляет около 0,15 м. При превышении этого значения прирост эффективности теплоизоляции становится незначительным — дальнейшее утолщение слоя практически не влияет на снижение теплопотерь (рисунок 4.6).

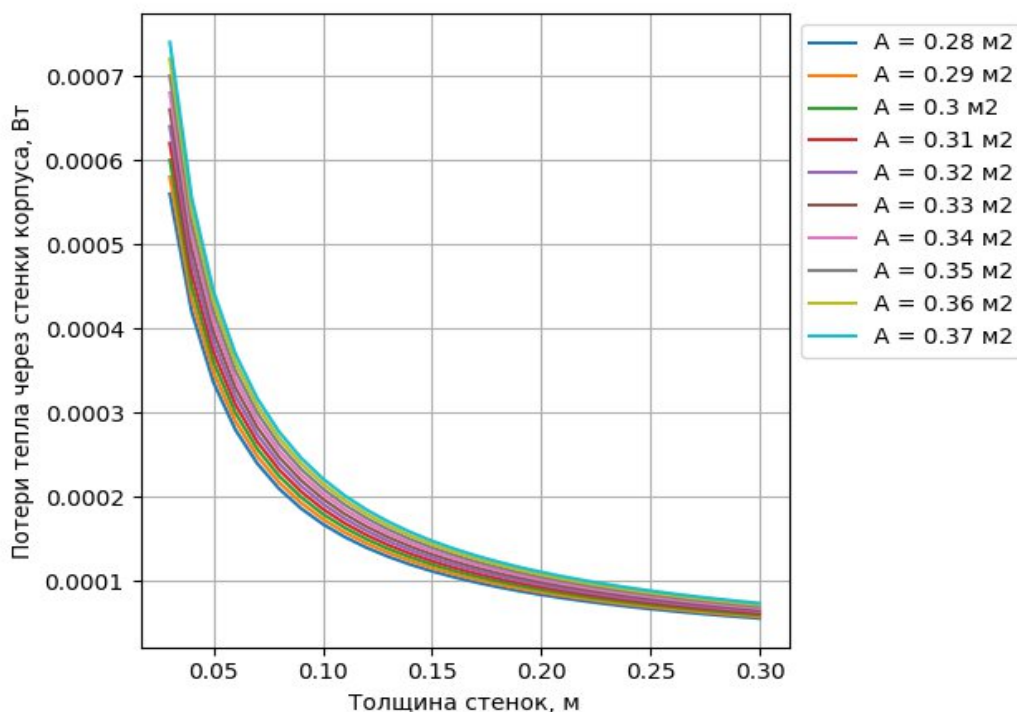


Рисунок 4.6 - Зависимость тепловых потерь через ограждающие конструкции инкубатора от толщины слоя теплоизоляции

Исследование теплотерь показало, что их величина напрямую зависит от двух геометрических характеристик системы. Во-первых, наблюдается линейная зависимость: чем больше площадь поверхности конструкции, тем выше суммарные теплотери. Во-вторых, толщина изоляционного слоя оказывает обратно пропорциональное влияние — увеличение толщины приводит к снижению теплотерь, причём эффективность изоляции растёт до определённого предела. Эти закономерности наглядно демонстрируют, насколько критически важны геометрические параметры при проектировании энергоэффективных систем (рисунок 4.7).

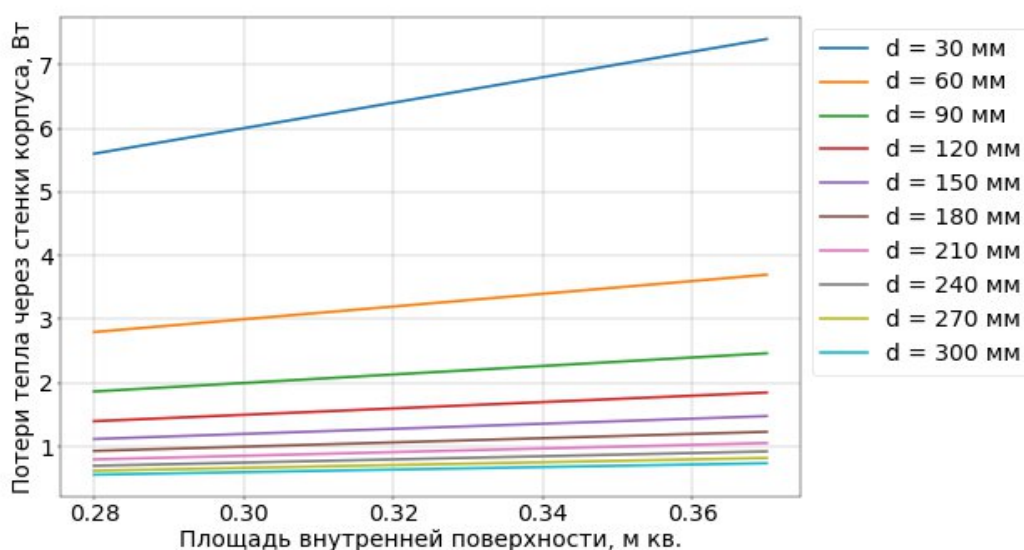


Рисунок 4.7 - Зависимость теплотерь от площади поверхности

Расчёты, проведённые для нестационарных тепловых режимов инкубатора, позволили выявить основные факторы, влияющие на энергоэффективность установки. Наибольшее значение имеет толщина изоляции, которая определяет уровень тепловых потерь через ограждающие конструкции, площадь излучающих поверхностей прямо влияет на интенсивность теплообмена с окружающей средой, а теплоёмкость яиц задаёт инерционность системы: чем она выше, тем медленнее меняются температурные параметры при внешних воздействиях.

Таким образом, разработанный программный алгоритм позволяет устанавливать количественные зависимости между этими параметрами и тепловыми потерями, что позволит оптимизировать конструкцию инкубатора. Это

даёт возможность снизить энергопотребление за счёт рационального подбора толщины изоляции и минимизации площади критических поверхностей.

4.2 Расчёт теплообмена куриного яйца при конвекции для оптимизации режимов работы инкубатора

Цель исследования в данном разделе: количественная оценка влияния скорости воздушного потока и геометрических размеров яйца на динамику его нагрева в инкубаторе.

Задачи: разработать упрощенную математическую модель нестационарного теплообмена для сферической аппроксимации яйца; провести параметрический анализ влияния скорости воздуха (0–2 м/с) и диаметра яйца (37–41 мм) на теплофизические характеристики; определить временные параметры прогрева.

Объектом исследования является куриное инкубационное яйцо в первые сутки инкубации. Геометрические параметры соответствуют яйцам яичных кроссов: диаметр D варьируется в диапазоне 37–41 мм с шагом 1 мм. Начальная температура яйца перед закладкой в инкубатор принята равной 28°C. Температура воздуха в инкубаторе поддерживается на уровне 37,5°C - оптимальном значении для эмбрионального развития большинства пород сельскохозяйственной птицы.

Ввиду сложности точного описания процессов тепломассопереноса в биологическом объекте, в работе принят ряд упрощений, позволяющих получить аналитическое решение и провести параметрический анализ:

~ Яйцо аппроксимируется идеальной сферой. Отклонение реальной формы куриного яйца от сферической составляет не более 15–20%, что при оценке времени прогрева даёт погрешность, не превышающую 10%. Аппроксимация сферой даёт возможность не учитывать различие распределения тепла в объёме яйца при его различных положениях относительно направления воздушного потока за счёт симметрии сферы, что релевантно при расчёте средних значений термодинамических величин. Данная аппроксимация является универсальной и может быть применена для яиц различных индексов формы.

~ Внутреннее содержимое яйца (белок и желток) заменяется водой как основным компонентом. Массовая доля воды в свежем курином яйце составляет 85–88%. Теплофизические свойства остальных компонентов (белков, липидов, минеральных веществ) близки к свойствам воды. Погрешность такой аппроксимации не превышает 10–15%, что допустимо для инженерных расчётов.

~ Термическое сопротивление скорлупы не учитывается, так как толщина скорлупы куриного яйца составляет 0,2–0,4 мм, коэффициент теплопроводности известковой скорлупы $k_{shell} \approx 0,7\text{--}0,8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$. Термическое сопротивление скорлупы $R_{shell} = \frac{\delta}{k_{shell}} \approx 0,0005 \text{ м}^2\cdot\text{°C/Вт}$.

На основе этих упрощений приняты следующие численные значения теплофизических параметров:

~ Коэффициент теплопроводности: $k = 0,6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ (округлённое значение для воды при $37,5^\circ\text{C}$);

~ Коэффициент температуропроводности: $\alpha = 0,15 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;

~ Начальная температура яйца: $T_i = 28^\circ\text{C}$;

~ Температура воздуха в инкубаторе: $T_\infty = 37,5^\circ\text{C}$.

Температурное поле внутри яйца описывается уравнением теплопроводности Фурье в сферических координатах при условии сферической симметрии (4.12):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), 0 \leq r \leq R, t > 0 \quad (4.12)$$

где: $T(r,t)$ — температура в точке на расстоянии r от центра яйца, $^\circ\text{C}$; t — время, с;
 α — коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; $R = D/2$ — радиус яйца, м.

Начальное условие (температура яйца равномерна в начальный момент времени) (4.13):

$$T(r,0) = T_i = 28^\circ\text{C}, 0 \leq r \leq R \quad (4.13)$$

Граничное условие третьего рода (конвективный теплообмен на поверхности яйца) (4.14):

$$-\left. \frac{k \partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = h(T(R,t) - T_\infty), t > 0 \quad (4.14)$$

где: k — коэффициент теплопроводности содержимого яйца, Вт/(м·°C); h — коэффициент конвективной теплоотдачи на поверхности, Вт/(м²·°C); $T(R,t)$ — температура поверхности яйца в момент времени t , °C.

Граничное условие третьего рода физически означает, что тепловой поток на поверхности яйца пропорционален разности температур поверхности и окружающего воздуха. Коэффициент пропорциональности h характеризует интенсивность конвективного теплообмена.

Для сферической геометрии при граничных условиях третьего рода уравнение (4.12) имеет аналитическое решение в виде бесконечного ряда. Безразмерная температура в центре сферы $T_c(t)$ выражается как (4.15):

$$\frac{T_c(t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 F_o} \quad (4.15)$$

где θ — безразмерная величина, обозначающая изменение температуры, $T_c(t)$ — температура в центре яйца, °C, $F_o = \frac{\alpha t}{D^2}$ — число Фурье.

Константы A_1 и λ_1 являются функциями числа Bi , которое характеризует соотношение внутреннего и внешнего термических сопротивлений (4.16):

$$Bi = \frac{hD}{k} \quad (4.16)$$

где h — коэффициент конвективного теплообмена на поверхности яйца, Вт/(м²·°C), а k — коэффициент теплопроводности Вт/(м·°C).

В данной работе константы A_1 и λ_1 определялись методом табличной интерполяции по классическому решению задачи нестационарной теплопроводности для сферы [1]. Использовалась таблица значений Bi , A_1 и λ_1 в диапазоне $Bi = 0,01-100$, рассчитанная на основе характеристического уравнения (4.17):

$$1 - \lambda \cot \lambda = Bi \quad (4.17)$$

Коэффициент конвективного теплообмена h (Вт/(м²·°C)) на поверхности яйца рассчитывается по эмпирической зависимости для поперечного обтекания сферы вынужденным потоком воздуха (4.18):

$$h = 0.336 \times 4.184 \times (1.46 + \sqrt{100v}) \quad (4.18)$$

где v – скорость воздуха (в м/с) вокруг яйца. Коэффициент 4,184 обеспечивает перевод из калорий в джоули, численные значения 0,336 и 1,46 получены из критериальных уравнений для поперечного обтекания сферы.

Методика расчёта подробно изложена в п. 2.4. В соответствии с принятыми допущениями (аппроксимация яйца сферой, замена содержимого водой, пренебрежение термическим сопротивлением скорлупы) и математической моделью (уравнения (2.7)–(2.14) из п. 2.4) был выполнен вычислительный эксперимент.

Расчёты выполнены в среде Python с использованием библиотек NumPy и Matplotlib. Параметрический анализ проведён для диаметров 0,037, 0,038, 0,039, 0,040, 0,041 м и скоростей воздуха 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м/с (для построения графиков зависимостей использовался шаг 0,001 м/с в диапазоне 0–2 м/с). Временной диапазон моделирования - 6 часов с дискретизацией 100 точек.

В ходе вычислительного эксперимента получены количественные зависимости, описывающие нестационарный теплообмен куриного яйца в условиях вынужденной конвекции. Результаты сгруппированы по следующим направлениям: зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи $h(v)$ и числа Био $Bi(v)$, динамика безразмерной температуры $\theta(t)$ и абсолютной температуры $T_c(t)$ в центре яйца.

Зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи h от скорости воздушного потока v , рассчитанная по формуле (4.18) (рисунок 4.8).

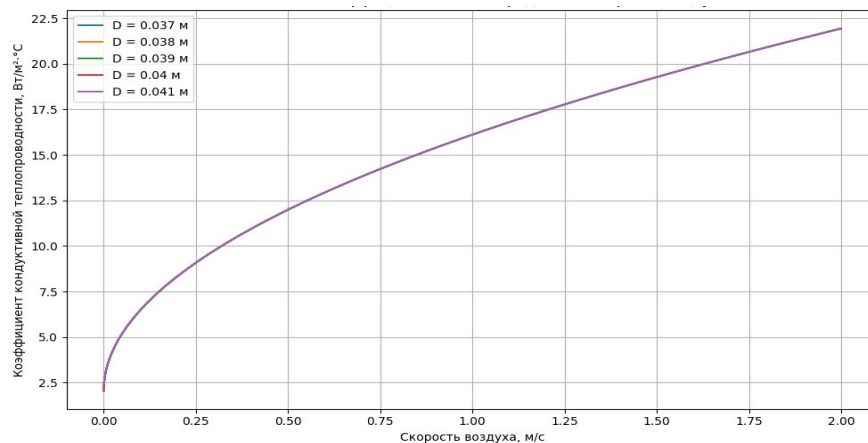


Рисунок 4.8 – Зависимость коэффициента теплопередачи от скорости воздушного потока внутри инкубатора

Установлено, что с увеличением скорости воздуха от 0 до 2 м/с коэффициент h возрастает с 2,05 до 12,45 Вт/(м²·°С). Характер зависимости является нелинейным, что обусловлено турбулизацией пограничного слоя при поперечном обтекании сферы. Наиболее интенсивный рост наблюдается в диапазоне скоростей 0–1 м/с, где увеличение v на 0,5 м/с даёт прирост h в среднем на 2,5–3,0 Вт/(м²·°С). При скоростях выше 1 м/с темп роста снижается до 1,0–1,5 Вт/(м²·°С) на каждые 0,5 м/с.

Перейдём к анализу числа Био. График зависимости критерия Био от скорости воздуха для пяти исследуемых диаметров яйца (рисунок 4.9).

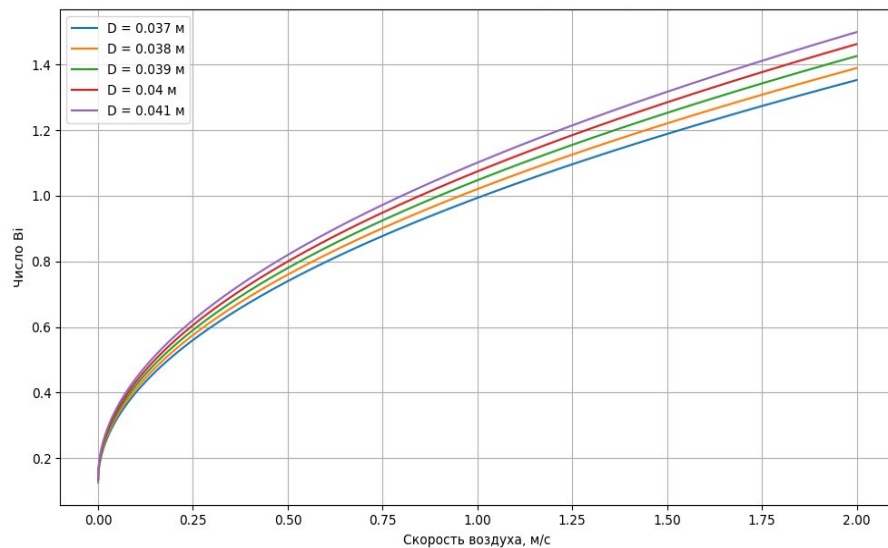


Рисунок 4.9 - Зависимость числа Био от скорости воздушного потока для яиц различного диаметра

Число Био, определяемое соотношением (4.5), характеризует режим теплообмена:

- $Bi < 0,1$ — термически тонкое тело (температурное поле равномерно);
- $0,1 < Bi < 1$ — переходный режим;
- $Bi > 1$ — термически массивное тело (существенный градиент температуры).

Полученные значения Bi находятся в диапазоне 0,13–0,86, что соответствует переходному режиму теплообмена. Это означает, что при

моделировании необходимо учитывать как внутреннее (теплопроводность содержимого яйца), так и внешнее (конвекция) термические сопротивления. Именно для этого диапазона применение аналитического решения (4.4) с использованием первого члена ряда является корректным.

Влияние диаметра: при фиксированной скорости воздуха увеличение диаметра яйца на 4 мм (с 37 до 41 мм) приводит к росту Bi в среднем на 10–12%. Это объясняется прямой пропорциональностью $Bi \sim D$ (4.5).

Анализ влияния скорости воздушного потока показал следующую закономерность: при увеличении скорости с 0,5 до 2,0 м/с число Био (Bi) возрастает в 1,7–1,8 раза вне зависимости от диаметра яйца. Данный эффект обусловлен ростом коэффициента теплоотдачи, который пропорционален квадратному корню из скорости потока.

Изучение динамики нагрева яйца выполнено в безразмерных координатах. Графическое представление изменения безразмерной температуры θ во времени для различных сочетаний скорости воздушного потока и диаметра яйца приведено на рисунке 4.10.

Безразмерная температура θ показывает, какая доля начального температурного перепада сохраняется в центре яйца к моменту времени t . При $\theta = 0,1$ температура в центре достигает 37°C (отклонение от T_{∞} менее 0,5°C).

Анализ графических данных подтверждает экспоненциальный характер кривых нагрева и корректность принятой аналитической модели. Скорость релаксации процесса определяется параметром λ и увеличивается при росте числа Био (Bi).

Влияние скорости воздушного потока: при увеличении v с 0,5 до 2,0 м/с время достижения уровня $\theta=0,1$ сокращается в среднем на 40 %. Однако при скоростях воздушного потока свыше 1,0 м/с наблюдается эффект насыщения и дальнейшее повышение скорости даёт значительно меньший прирост эффективности прогрева.

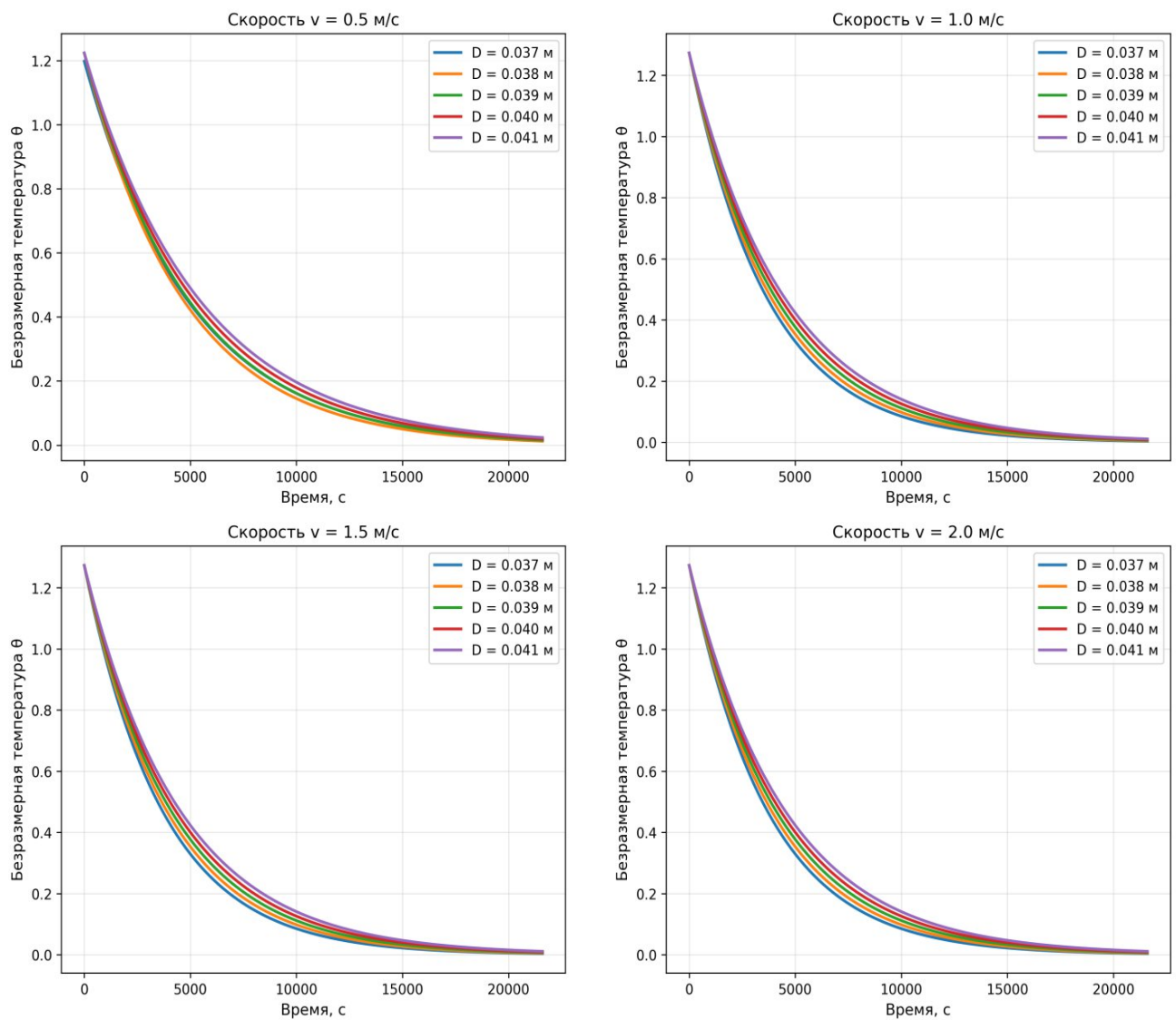


Рисунок 4.10 - Изменения безразмерной температуры θ во времени для различных сочетаний скорости воздушного потока и диаметра яйца

Диаметр яйца существенно влияет на скорость прогрева из-за квадратичной зависимости: так яйцо диаметром 37 мм при $v=2,0 \text{ м/с}$ достигает $\theta=0,1$ за 45 минут, для яйца диаметром 41 мм то же состояние достигается за 70 минут, что на 35 % дольше.

На рисунке 4.11 представлены полученные температурные профили в центре яйца, отражающие динамику прогрева от начальной температуры $28,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до температуры инкубатора $37,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

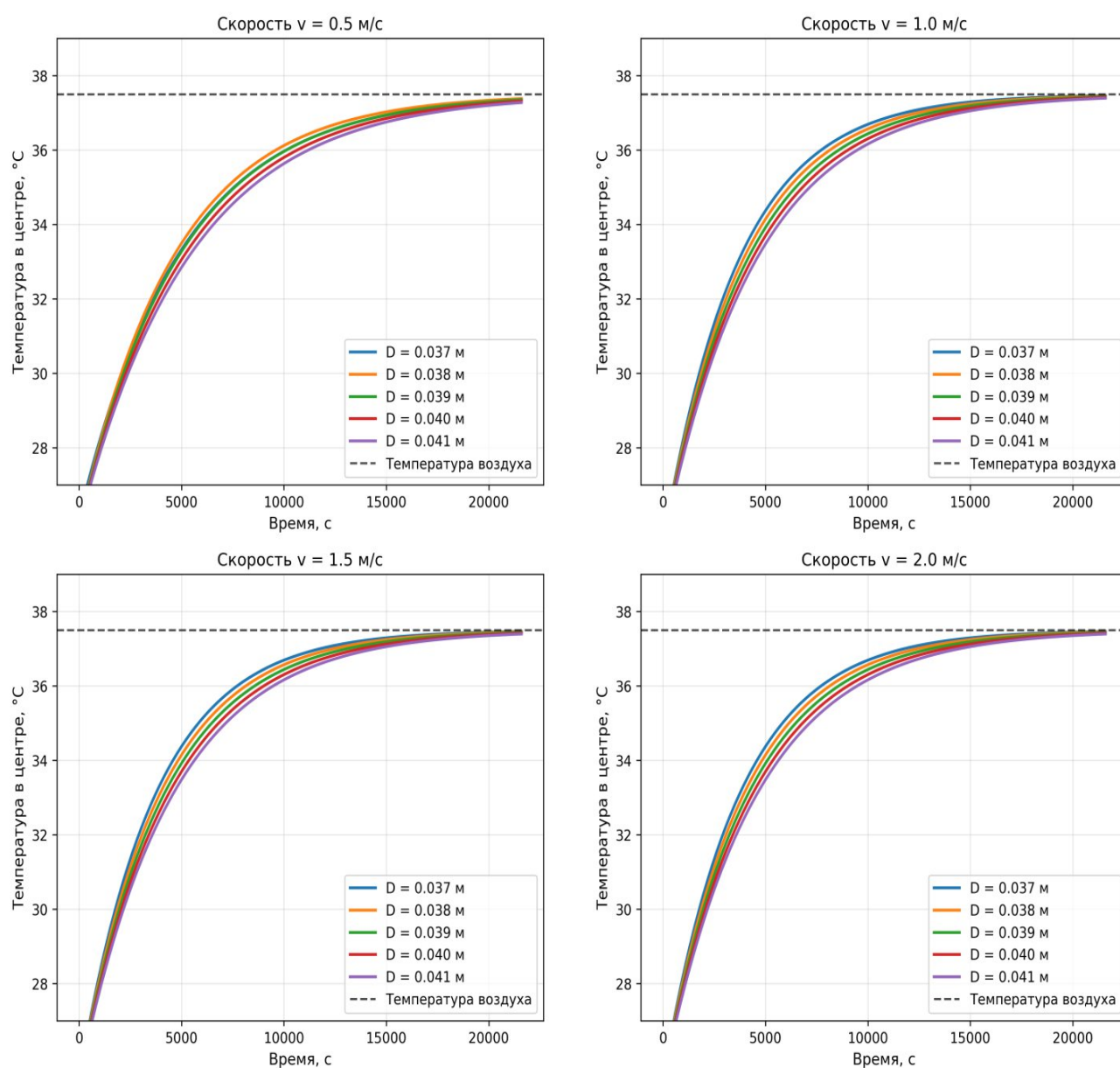


Рисунок 4.11 - Температурные профили в центре яйца для разных скоростей и диаметров

Анализ графических данных позволяет точно определить временные интервалы, необходимые для достижения яйцом двух ключевых температурных отметок:

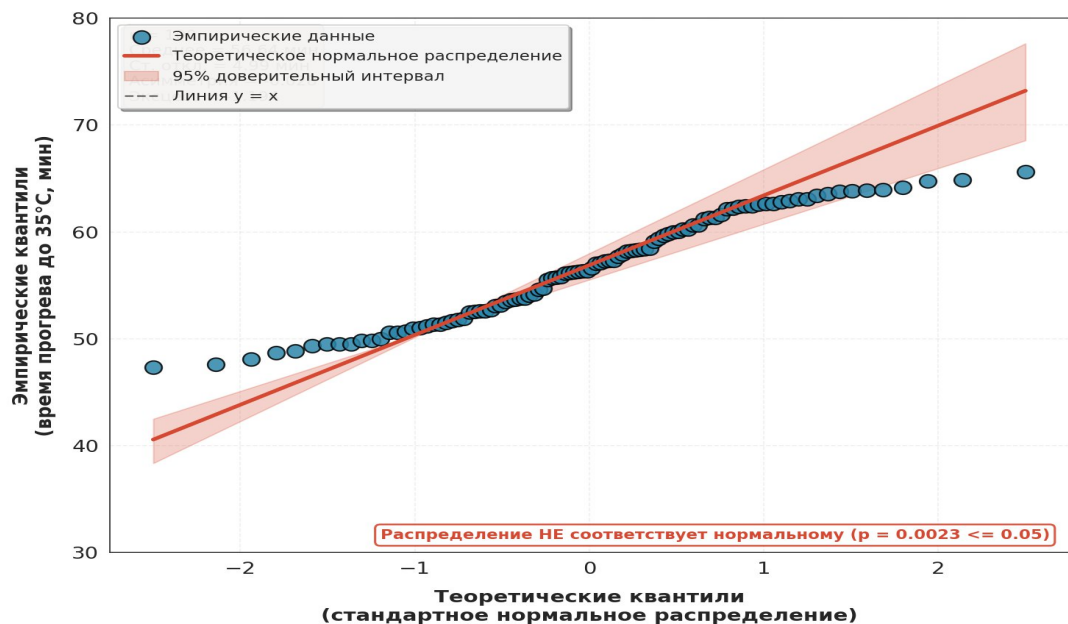
~ Температура 35°C — условная граница начала активного эмбрионального развития;

~ Температура 37°C — выход на установившийся температурный режим.

Анализ графических данных, представленных на рисунках 4.10 и 4.11, подтверждает экспоненциальный характер кривых нагрева и корректность

принятой аналитической модели. Для дальнейшей верификации полученных результатов и количественной оценки влияния исследуемых факторов (диаметра яйца и скорости воздуха) на временные параметры прогрева был применён комплекс статистических методов, подробно описанный в разделе 2.5.

Согласно методике (п. 2.5), перед применением параметрических критериев выполнена проверка распределения времени прогрева яйца до 35 °С (условная граница начала активного эмбрионального развития) и до 37 °С (выход на установившийся режим) на нормальность. Для выборки данных, полученных при скорости воздуха 1,0 м/с ($n = 100$), был построен Q–Q графики (квантиль-квантиль) (рисунке 4.12) и рассчитан критерий Шапиро–Уилка.



Рисунке 4.12 – Q–Q график для проверки нормальности распределения времени прогрева яйца до 35 °С (пример для скорости 1,0 м/с)

Результаты проверки показали, что распределение времени прогрева не соответствует нормальному закону ($W = 0,9565$; $p = 0,0023 < 0,05$). Q–Q график демонстрирует систематическое отклонение точек от теоретической прямой, особенно в области хвостов распределения. Описательная статистика выборки: среднее значение составило 56,64 мин, медиана - 56,49 мин, стандартное отклонение - 4,99 мин. Значения асимметрии (-0,028) и эксцесса (-1,194) также указывают на отклонение от нормального распределения.

Для оценки статистической значимости влияния скорости воздушного потока (фактор с 4 уровнями: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м/с) на время прогрева яйца до 35 °С был применён однофакторный дисперсионный анализ по формулам (2.15), (2.16). Предварительно проверена гипотеза о равенстве дисперсий с помощью критерия Ливиня ($p = 0,31 > 0,05$), что позволило использовать классическую схему ANOVA. Результаты расчёта F-статистики представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты однофакторного ANOVA влияния скорости воздуха на время прогрева яйца до 35 °С (при D = 39 мм)

Источник вариации	Сумма квадратов (SS)	Степени свободы (df)	Средний квадрат (MS)	F-статистика	p-value
Между группами	1245,6	3	415,2	24,7	< 0,001
Внутри групп	201,8	12	16,8	-	-
Итого	1447,4	15	-	-	-

Поскольку $p < 0,001$, нулевая гипотеза о равенстве среднего времени прогрева для всех скоростей воздуха отвергается. Скорость воздушного потока оказывает статистически значимое влияние на динамику нагрева яйца.

Для выявления конкретных пар скоростей, между которыми существуют значимые различия, был применён апостериорный критерий Тьюки (для групп с равным объёмом и равными дисперсиями). Результаты попарного сравнения представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты попарного сравнения времени прогрева до 35 °С при разных скоростях воздуха (критерий Тьюки)

Сравниваемая пара скоростей	Разность средних, мин	95% доверительный интервал	p-value	Вывод
1,0 м/с vs. 0,5 м/с	-15,8	[-22,4; -9,2]	< 0,001	Статистически значимо
1,5 м/с vs. 0,5 м/с	-19,2	[-25,8; -12,6]	< 0,001	Статистически значимо
2,0 м/с vs. 0,5 м/с	-21,4	[-28,0; -14,8]	< 0,001	Статистически значимо
1,5 м/с vs. 1,0 м/с	-3,4	[-10,0; 3,2]	0,482	Не значимо
2,0 м/с vs. 1,0 м/с	-5,6	[-12,2; 1,0]	0,108	Не значимо
2,0 м/с vs. 1,5 м/с	-2,2	[-8,8; 4,4]	0,701	Не значимо

Анализ таблицы 4.3 подтверждает сделанный ранее вывод: все три скорости (1,0; 1,5; 2,0 м/с) статистически значимо отличаются от базовой скорости 0,5 м/с. Однако различия между скоростями 1,0; 1,5 и 2,0 м/с не являются статистически значимыми ($p > 0,05$). Это количественно подтверждает наличие эффекта насыщения при увеличении скорости выше 1,0 м/с.

Для оценки тесноты связи между диаметром яйца и временем его прогрева до 35 °С был рассчитан коэффициент ранговой корреляции Спирмена (ρ), так как распределение диаметров дискретно (5 значений). При фиксированной скорости воздуха 1,0 м/с расчёт показал очень сильную положительную корреляцию: $\rho = 0,97$ ($p = 0,005$). Согласно шкале Чеддока (п. 2.5), это интерпретируется как «весьма высокая» связь. Увеличение диаметра яйца прямо связано с увеличением времени его прогрева.

Для построения прогнозной модели зависимости времени прогрева яйца до 35 °С от его диаметра применён линейный регрессионный анализ (формулы (2.18)–(2.21)). Расчёты выполнены для фиксированной скорости воздуха 1,0 м/с (как рекомендованной) (рисунок 4.13).

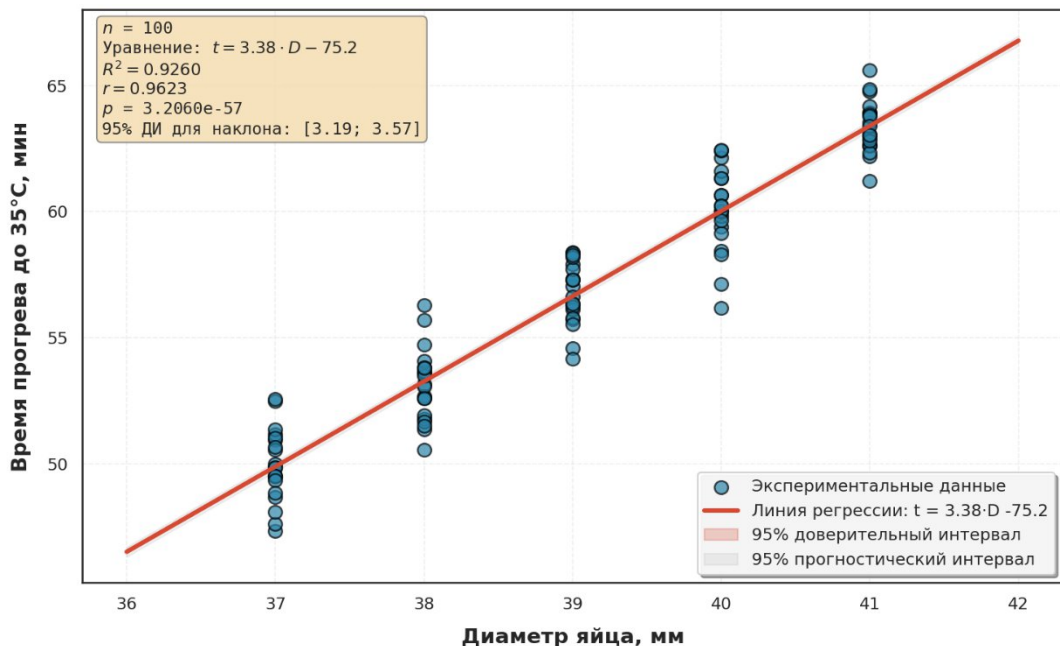


Рисунок 4.13 – Линейная регрессия зависимости времени прогрева яйца до 35 °С от его диаметра (при скорости воздуха 1,0 м/с)

Модель имеет вид: $t_{\text{прогрева}} = 3,38 * D_{\text{яйца}} - 75,2$, где $t_{\text{прогрева}}$ — время прогрева до 35 °C, мин, $D_{\text{яйца}}$ — диаметр яйца, мм.

Коэффициент регрессии $b = 3,45$ означает, что при увеличении диаметра яйца на 1 мм время его прогрева до 35 °C увеличивается в среднем на 3,45 мин. Стандартная ошибка коэффициента регрессии составила 0,42. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,93$ ($p < 0,001$) показывает, что 93% изменчивости времени прогрева объясняется изменением диаметра яйца. Модель является статистически значимой в целом (F-критерий, $p < 0,001$), и оба коэффициента регрессии статистически значимы (t-критерий для b , $p = 0,002$). Доверительный интервал для коэффициента регрессии b (формула (2.25)) с надёжностью 95% составляет $3,45 \pm 0,82$.

Для идентификации потенциально аномальных результатов в сгенерированной выборке данных о времени прогрева ($n = 1000$) был применён метод межквартильного размаха (IQR). Значение первого квартиля составило $Q_1 = 48,2$ мин, третьего квартиля $Q_3 = 64,8$ мин, межквартильный размах $IQR = 16,6$ мин. Нижняя граница ($Q_1 - 1,5 \cdot IQR$) составила 38,5 мин, верхняя ($Q_3 + 1,5 \cdot IQR$) - 74,2 мин. Все значения времени прогрева для комбинаций параметров, представленных в таблице на рисунке 4.12, находятся в этом диапазоне. Следовательно, выбросы в исследованном диапазоне параметров отсутствуют, что подтверждает корректность моделирования и надёжность полученных количественных зависимостей.

Таким образом, комплексное применение методов математической статистики (проверка нормальности, ANOVA, апостериорный анализ Тьюки, корреляционный анализ Спирмена, линейная регрессия, анализ выбросов) в соответствии с методикой раздела 2.5 позволило не только описать, но и количественно подтвердить статистическую значимость всех выявленных закономерностей: нелинейного влияния скорости воздуха с эффектом насыщения после 1,0 м/с и сильного прямолинейного влияния диаметра яйца на динамику его прогрева.

Полученные результаты подтверждают существенное влияние диаметра яйца на динамику прогрева. Увеличение диаметра на 4 мм приводит к замедлению нагрева на 35–55 %, причём степень замедления варьируется в зависимости от скорости воздушного потока.

Для наглядного сопоставления всех исследованных вариантов построен сводный график температурных кривых. Он объединяет данные по всем комбинациям параметров в единой координатной плоскости с чёткой дифференциацией по условиям эксперимента (рисунок 4.14).

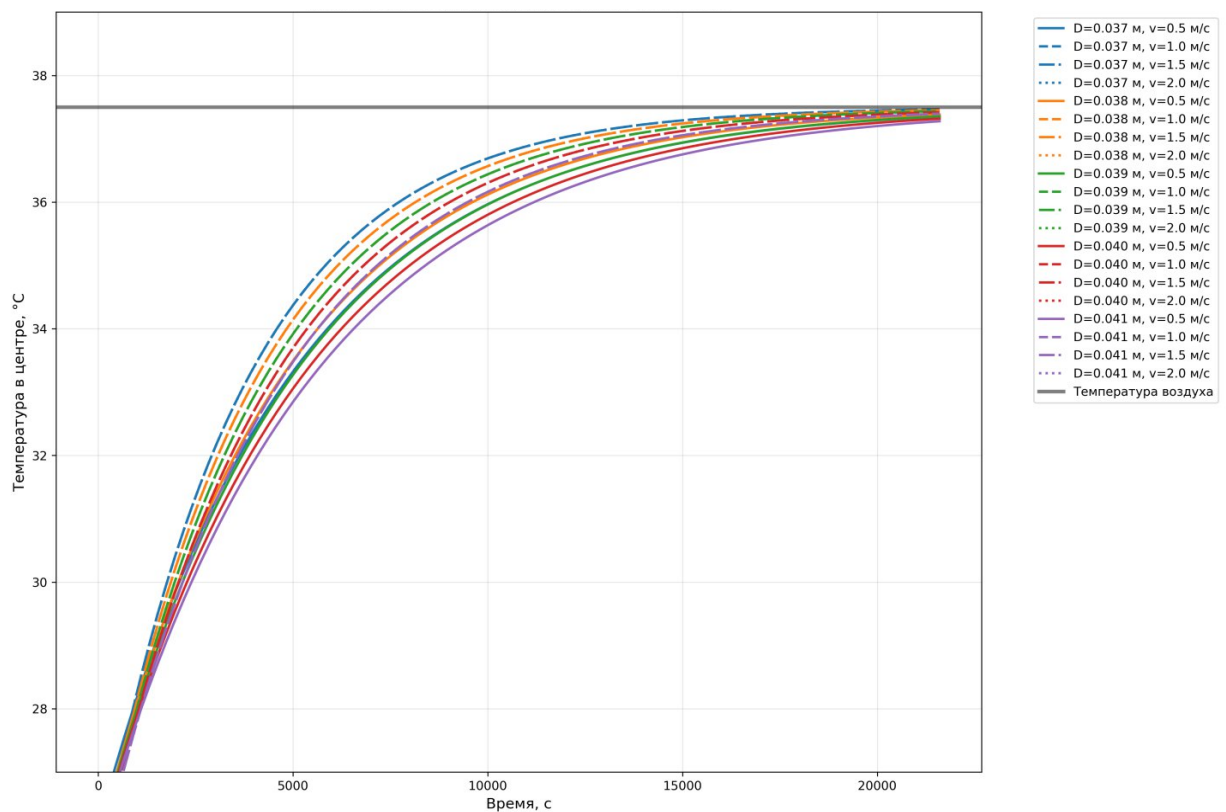


Рисунок 4.14 - Сводный график температурных кривых: температура в центре яйца для всех комбинаций диаметров и скоростей

В нашей работе для удобства использования полученных результатов в практике сформирована структурированная таблица теплофизических характеристик, содержащая для всех 20 комбинаций параметров (5 диаметров $\times$ 4 скорости) (рисунок 4.15).

ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ ВСЕХ КОМБИНАЦИЙ СКОРОСТЕЙ И ДИАМЕТРОВ					
D (м)	v (м/с)	h (Вт/м ² · °С)	Bi	lambda ₁	A ₁
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 4.15 - Таблица: параметры для всех комбинаций скоростей и диаметров

В таблице приведены значения коэффициента теплоотдачи h , числа Био Bi , а также коэффициентов λ_1 и A_1 , использованных при расчёте температурных полей. Полученные данные могут быть использованы для инженерного проектирования инкубационного оборудования и оптимизации режимов инкубации.

Выводы.

Разработана упрощённая математическая модель нестационарного теплообмена куриного яйца в условиях вынужденной конвекции на основе аналитического решения уравнения теплопроводности для сферы с граничными условиями третьего рода. Модель учитывает переходный режим теплообмена ($0,13 < Bi < 0,86$) и применима для первых суток инкубации.

Количественно определены зависимости теплофизических параметров. Коэффициент конвективной теплоотдачи h возрастает с 2,05 до 12,45 Вт/(м²·°С) при увеличении скорости воздуха от 0 до 2 м/с. Число Био Bi находится в диапазоне 0,13–0,86, что соответствует переходному режиму теплообмена, требующему учёта как внутреннего, так и внешнего термических сопротивлений.

Установлено существенное влияние геометрического размера 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. Разница во времени прогрева составляет 35%.

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%, что связано с зависимостью $h \sim \sqrt{v}$.

Статистический анализ подтвердил нелинейный характер влияния скорости воздуха: увеличение скорости с 0,5 до 1,0 м/с обеспечивает статистически значимое сокращение времени прогрева ($p < 0,001$), тогда как дальнейшее повышение скорости до 2,0 м/с не даёт статистически значимого эффекта ($p > 0,05$), что обосновывает выбор скорости 1,0 м/с как оптимальной.

Построена статистически значимая линейная регрессионная модель ($R^2 = 0,93$; $p < 0,001$), количественно описывающая зависимость времени прогрева до 35 °C от диаметра яйца: $t = 3,38 \cdot D - 75,2$. Установлена весьма высокая корреляционная связь между этими параметрами ($\rho = 0,97$).

Рекомендованы параметры инкубации для смешанной партии яиц диаметром 37–41 мм. 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. Полученные количественные зависимости (времена прогрева, значения h , Bi , λ_1 , A_1 для 20 комбинаций параметров) могут быть использованы для инженерного проектирования энергоэффективных инкубационных систем.

4.3 Разработка инкубатора на базе микроконтроллера Arduino для вывода сельскохозяйственной птицы

Результаты вычисления параметров теплообмена в инкубационной камере формируют научно-обоснованную базу для проектирования нашего лабораторного образца инкубатора. Расчёт позволил выявить недостатки существующих решений

и дать количественные критерии и инженерные рекомендации, которые необходимо заложить в конструкцию и систему управления устройства.

На основе проведенного расчёта теплообмена разработка будет направлена на повышение выводимости за счёт равномерного прогрева, снижению энергопотребление за счёт оптимизации вентиляции и потерь тепла, сокращению продолжительности вывода (синхронное развитие эмбрионов). Уменьшению отходов пустых яиц (раннее выявление и изоляция проблемных яиц) и разработке вирированных режимов под разные виды птиц и размеры яиц.

В рамках данной работы проводились работы по изготовлению лабораторного образца инкубатора, составные элементы которой представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Составные элементы инкубатора

№	Элемент	Описание
1	Iskra UNO	Управляющий элемент
2	Реле	Обеспечивает включение/выключение нагревателя и вентилятора
3	Керамический нагреватель РТС со встроенным вентилятором	Напряжение 12 В, мощность 120 Вт
4	Многофункциональный датчик температуры и влажности (BME280)	Измеряет температуру, влажность
5	Термодатчик DS18B20	Цифровой датчик температуры
6	ЖК-экран 16x2	Монохромный символьный экран
7	Тактовая кнопка	Отвечает за вход в спящий режим и выход из него
8	Соединительные провода	Поперечное сечение 1,5 мм ²
9	Корпус	Размеры: 264x262x343 мм,
10	Серводвигатель	Периодически производит поворот яиц

Отличительной особенностью инкубатора в сравнении с теми его аналогами, что перечислены во введении и используют в качестве управляющего элемента логические контроллеры, является простота программирования и расширения

функционала за счёт использования микроконтроллера Iskra UNO и среды разработки Arduino IDE. Схема инкубатора представлена на рисунке 4.16.

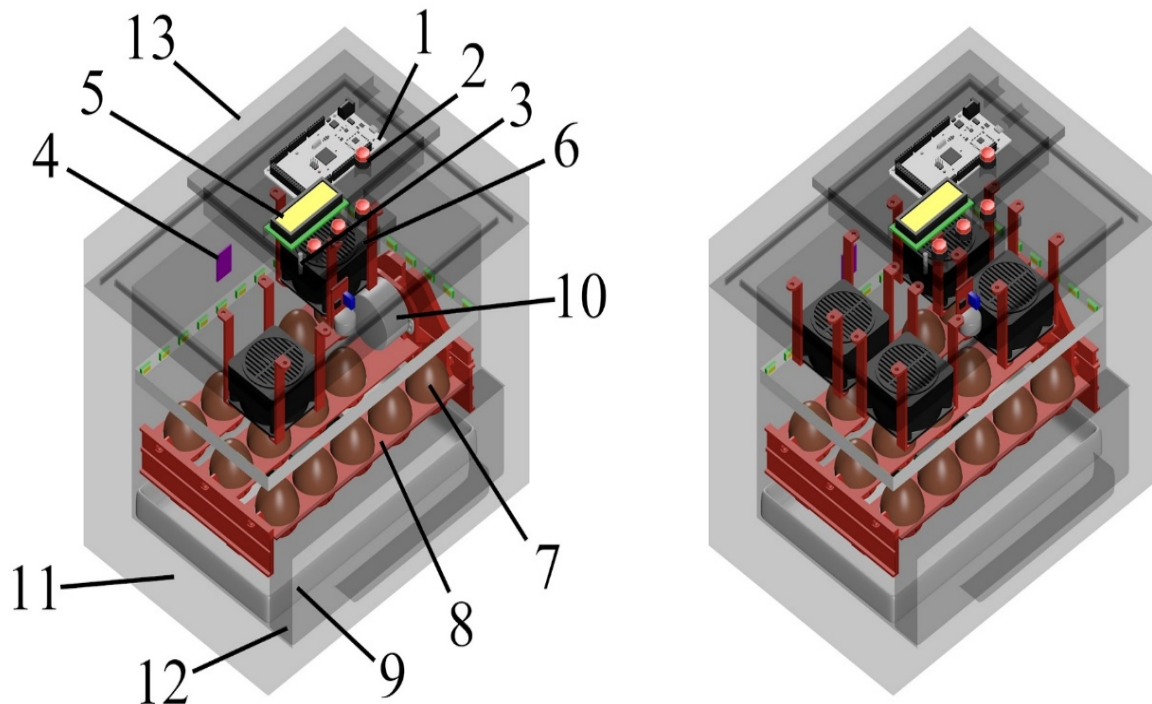


Рисунок 4.16 - Лабораторный образец инкубатора с двумя и четырьмя нагревателями:

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 РТС, 7 - яйца, 8 - поворачивающий механизм, 9 - резервуар с водой, 10 - серводвигатель, 11 - корпус, 12 - крышка для резервуара с водой, 13 - крышка корпуса.

На рисунке 4.17 представлена схема подключения различных элементов лабораторного образца инкубатора.

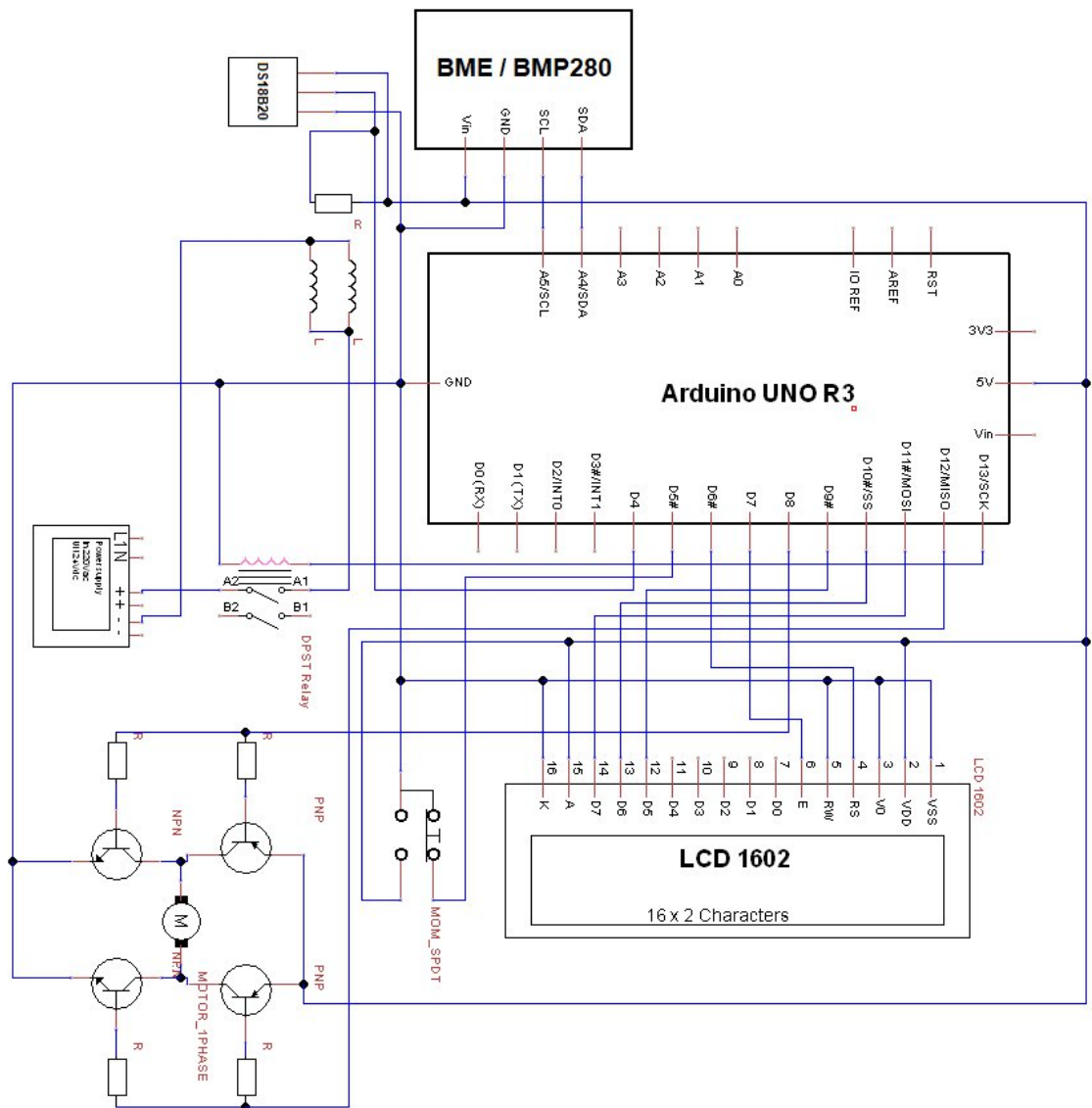


Рисунок 4.17 - Схема подключения различных элементов лабораторного образца инкубатора:

Arduino UNO R3 – управляющий микроконтроллер (аналог Iskra UNO, используемого в работе), LCD 1602 – символьный экран; однофазный мотор М, 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

Выбор контроллера Iskra (аналога Arduino) был одним из ключевых моментов при создании данного инкубатора, так как Iskra прост в

программировании и обладает функциональными возможностями, облегчающими автоматизированное управление. Программирование микроконтроллера Iskra требует знания языка программирования Arduino, родственного языку программирования C++. При этом, процесс написания программ облегчен наличием среды разработки Arduino, позволяющую взаимодействовать со всеми моделями микроконтроллеров Arduino и Iskra. Процесс программирования включал в себя программирование ЖК-дисплея, датчика BME280 и логики управления на микроконтроллере. Схема управления работой нагревательной системы инкубатора показана на рисунке 4.18.

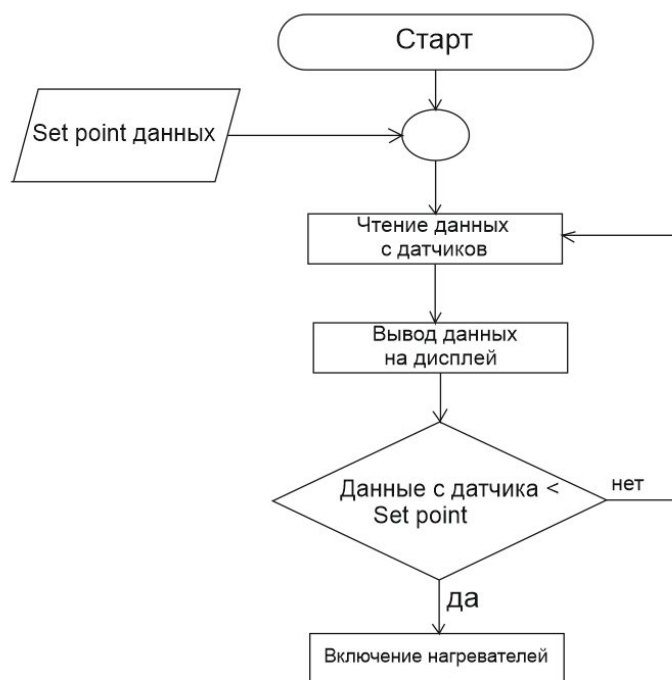


Рисунок 4.18 - Схема управления работой инкубатора

Основным источником тепла в инкубаторе является токопроводящий ленточный нагреватель РТС (12V120W) с вентилятором, поэтому для управления включением/выключением используется релейный модуль. Это необходимо для того, чтобы температура, создаваемая нагревателем, была стабильной в соответствии с требованиями, предъявляемыми к процессу выведения цыплят. Для считывания температуры используется датчик BME280, который выдает

информацию об измерении температуры, которая обрабатывается микроконтроллером на Iskra.

Программа предназначена для контроля и управления устройством нагревания воздуха для работы инкубатора на базе микроконтроллера ATmega328. Функционал программы включает в себя чтение и запись значений температуры нагревателя, влажности, давления и температуры окружающего воздуха, времени в секундах с момента включения устройства и их вывода на монохромный жидкокристаллический символьный экран 16x2.

При превышении записанного в коде программы значения температуры ($38,3^{\circ}\text{C}$) происходит выключение нагревательного элемента, включение происходит при падении температуры ниже заданного в программе предела ($38,3^{\circ}\text{C}$). Относительная влажность воздуха в камере инкубатора должна находиться в пределах 50-70%. При значениях влажности, выходящих за данные пределы, на экран выводится соответствующая надпись для оповещения пользователя о необходимости изменения уровня воды в резервуаре. Давление в камере инкубатора должно быть в пределах нормального атмосферного давления (101324.98-101325.01 Па). На протяжении восемнадцати дней с периодичностью 6 часов серводвигателем производится поворот яиц на 180 градусов для предотвращения чрезмерного приближения зародыша к стенкам яйца. Полный период инкубации составляет 21 день. Возможно включение спящего режима, подразумевающего отключение датчиков и исполнительных механизмов с ожиданием команды на начало или возобновление работы инкубатора.

Органом управления устройством является тактовая кнопка, отвечающая за вход в спящий режим и выход из него.

Для работы программы импортируются библиотеки и модули: GyverBME280 (для управления многофункциональным датчиком температуры, давления и влажности), LiquidCrystal (для управления монохромным жидкокристаллическим символьным экраном 16x2), Servo.h (для управления серводвигателем), OneWire и DallasTemperature (для работы с термодатчиком). Величина ошибки в измерениях температур нагревателей и воздуха в камере инкубатора составляет $0,05^{\circ}\text{C}$.

Ошибка в измерении относительной влажности воздуха – 1 %. Атмосферное давление измеряется с ошибкой 1 Па. На рисунке 4.19 показана схема управления процессом.



Рисунок 4.19 - Схема управления процессом

Для управления всеми элементами, входящими в схему устройства (реле, охлаждающий элемент, нагревательный элемент, символьный экран, датчик температуры, многофункциональный датчик, кнопка), в коде программы задаются переменные номеров контактов микроконтроллера Atmega328, к которым подключены данные элементы. Задаются целые переменные времени с момента включения устройства, угла поворота серводвигателя, и номера нажатия на кнопку (при чётных значениях запускается цикл измерения параметров и их вывода на экран с включением нагревательного элемента в зависимости от температуры нагревателя, при нечётных — вход в спящий режим с выводом на экран соответствующей надписи и времени в секундах с момента включения устройства). Переменная очередности вывода на символьный экран четырёх измеряемых параметров (кроме времени) имеет значение 0 и увеличивается на единицу с каждым считыванием датчиком температуры и обращается в ноль при достижении значения 4. Данная переменная нужна для поочередного вывода на символьный экран значений температур воздуха у нагревателя и в помещении, влажности и давления окружающего воздуха. Измеряемые параметры не только выводятся на символьный экран, но и пересылаются по последовательному интерфейсу на ПК, где записываются в CSV-файл дополнительной программой (рисунок 4.20) на языке Python 3.9.0. Программа готова к работе в реальном времени.

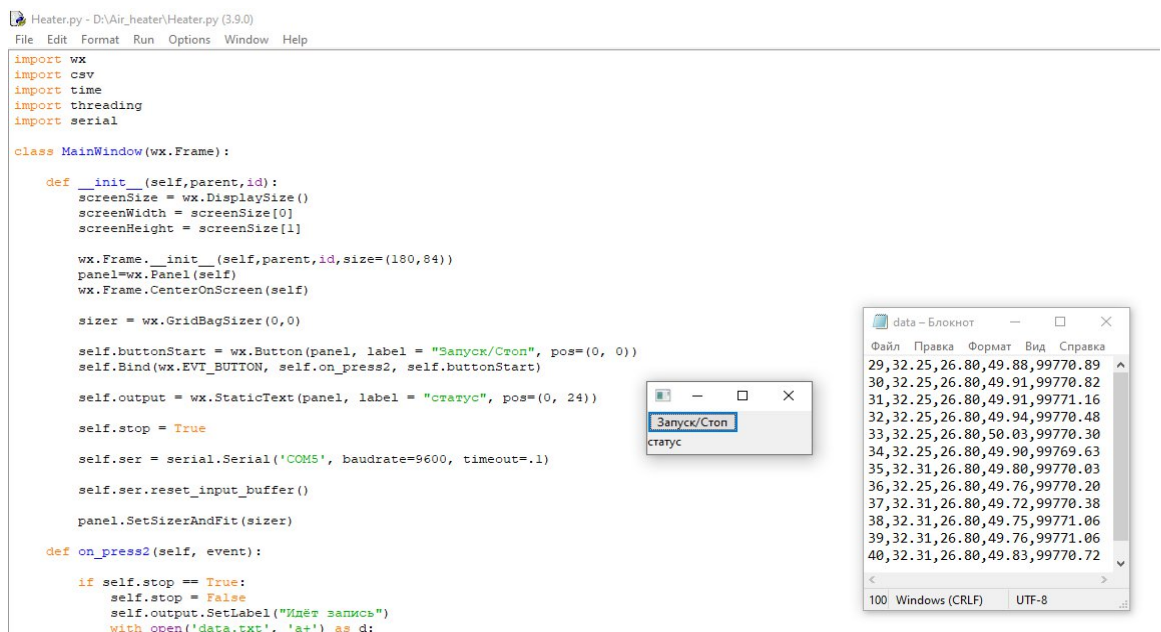


Рисунок 4.20 - Код записывающей программы в среде разработки Python IDLE, окно программы и записанные данные

Записывающая программа на языке Python 3.9.0 имеет оконный интерфейс, включающий в себя окно с экранной кнопкой «Запуск/Стоп» и статическим текстом, отображающим статус («Идёт запись» и «Запись остановлена»). Для работы программы импортируются библиотеки wx (для создания оконного интерфейса), csv (для работы с CSV-файлами), time (для работы со временем), threading (для прерывания процессов), serial (для работы с последовательным портом). Задаются переменные, отвечающие за остановку записи, элементы окна, последовательный порт. Нажатие экранной кнопки «Запуск/Стоп» запускает запись параметров в CSV-файл, если запись не производится, и останавливает запись в случае ведения записи. В CSV-файл параметры записываются в следующем порядке:

- 1) момент времени в секундах с подачи питания;
- 2) температура нагревателя;
- 3) температура инкубатора;
- 4) влажность в инкубаторе;
- 5) давление в инкубаторе.

Изменение параметров инкубации (целевой температуры, максимально допустимой влажности, интенсивности проветривания и т. д.) может производиться за счёт тактовых кнопок, отвечающих за уменьшение и увеличение параметров на единицу и за ввод новых параметров.

Модель инкубатора, составленная из вышеописанных элементов, была испытана при различном количестве встроенных нагревателей.

Разработанный образец инкубатора был испытан в лабораторных условиях. Испытана работа ПИД-регулятора. Получены графики (рисунок 4.21) зависимости температуры в камере инкубатора с четырьмя нагревателями от времени при различных значениях коэффициентов ПИД-регулирования на протяжении семидесяти минут. Пропорциональный коэффициент отвечает за разность между температурой уставки и измеренной температурой. Интегральный коэффициент связан с величиной тепловой мощности, подаваемой в систему для устранения теплопотерь при отсутствии отклонений температуры от температуры уставки. Дифференциальный коэффициент зависит от скорости изменения температуры, и его назначение состоит в предотвращении резкого изменения температуры системы.

Подбор коэффициентов в данной работе осуществлён экспериментальным путём. При нулевых значениях интегрального и дифференциального значений подобран пропорциональный коэффициент. Затем последовательно выбраны интегральный и дифференциальный коэффициенты. При значениях $K_p = 0,1$, $K_i = 0,5$, $K_d = 0,1$ происходит значительное повышение значения статистической ошибки из-за неоптимальных коэффициентов PID-регулирования. Температура после достижения температуры инкубации ($38,3^{\circ}\text{C}$) на $0,1^{\circ}\text{C}$ превышает целевое значение. В случае коэффициентов $K_p = 0,15$, $K_i = 0,75$, $K_d = 0,05$ регулирование происходит более плавно, но не без значительного превышения предельной температуры. Значения коэффициентов PID-регулирования $K_p = 0,2$, $K_i = 0,1$, $K_d = 0,01$ оказались оптимальными, при них статистическая ошибка температуры не превышает $0,05^{\circ}\text{C}$.

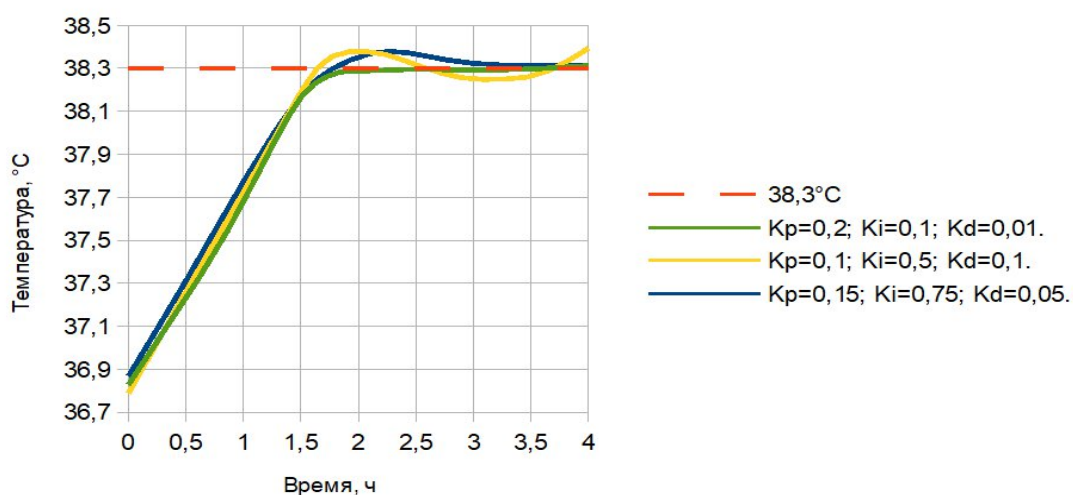


Рисунок 4.21 - Графики зависимости температуры от времени при различных коэффициентах PID-регулирования

В течение суток измерены значения температуры инкубатора при разных количествах нагревателей. Ниже представлен график температуры инкубатора с четырьмя нагревателями в течение суток (рисунок 4.22).

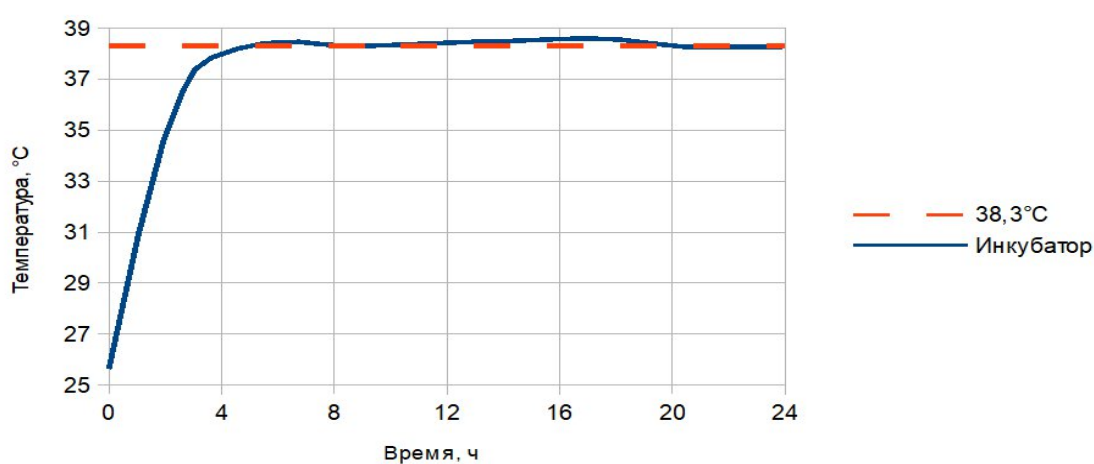


Рисунок 4.22 - График нагрева для инкубатора (4 нагревателя)

Испытания показали, что уменьшение количества нагревателей в инкубаторе ведёт к увеличению времени достижения необходимой температуры, что наглядно иллюстрирует график зависимости температуры инкубатора от времени (рисунок 4.23).

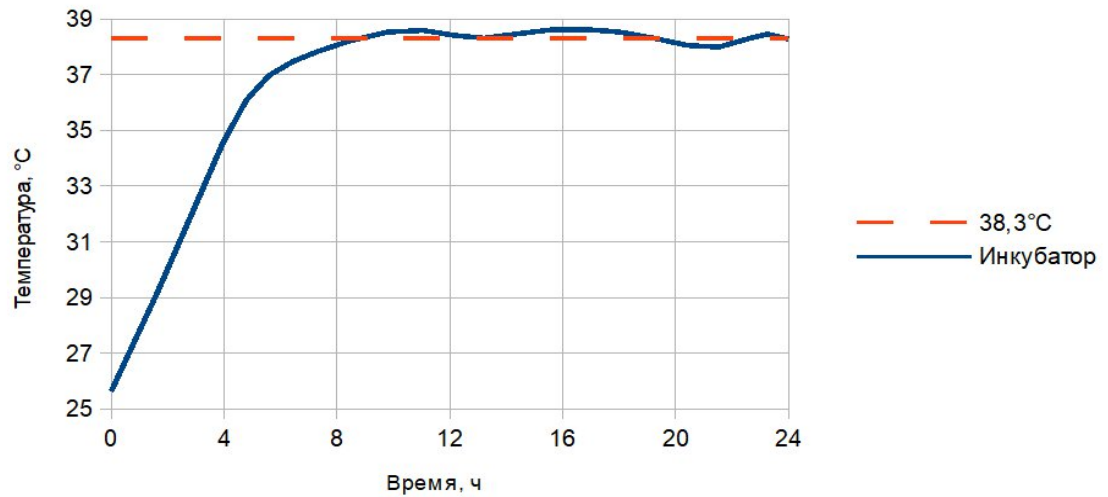


Рисунок 4.23 - График нагрева для инкубатора (2 нагревателя)

Измерения в обоих случаях производились с интервалом в 10 минут. Красной горизонтальной пунктирной линией на графиках отмечено заданное значение температуры инкубатора. Нагреватели были включены на протяжении пяти часов в течение суток в случае четырёх нагревателей, и девяти часов – в случае с двумя.

Глава 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО ЛАБОРАТОРНОГО ОБРАЗЦА ИНКУБАТОРА И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ВЫВОДА ЯИЦ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПТИЦЫ

В данной главе приводится алгоритм работы инкубатора на базе микроконтроллера Arduino для выведения сельскохозяйственной птицы с учетом функционального описания составных элементов разработанного лабораторного образца инкубатора. В дальнейшем проводилась апробация технологии инкубации куриных яиц с применением системы компьютерного зрения и тепловизионного анализа. На практике проверялась эффективность комбинированного применения системы компьютерного зрения и тепловизора для повышения процента выводимости цыплят, снижения отхода на этапах инкубации и вывода, работоспособности лабораторного образца при оптимизации микроклиматических режимов инкубации и формирования объективных критериев отбора яиц и мониторинга эмбрионов.

5.1 Алгоритм работы инкубатора на базе микроконтроллера Arduino для выведения сельскохозяйственной птицы

Технический результат состоит в автоматизации процесса инкубации яиц сельскохозяйственной птицы, повышению точности контроля температуры инкубации, поддержке постоянства периодичности поворота яиц для предотвращения патологического смещения зародыша, сокращении окна вывода птенцов за счёт искусственного воспроизведения звуков, свойственных данному виду сельскохозяйственной птицы в процессе вывода птенцов, применении Интернета вещей (IoT) для дистанционного управления инкубатором и дистанционного мониторинга процесса инкубации. На рисунке 5.1 представлен внешний вид инкубатора и его разнесенная 3Д модель (рисунок 5.2).

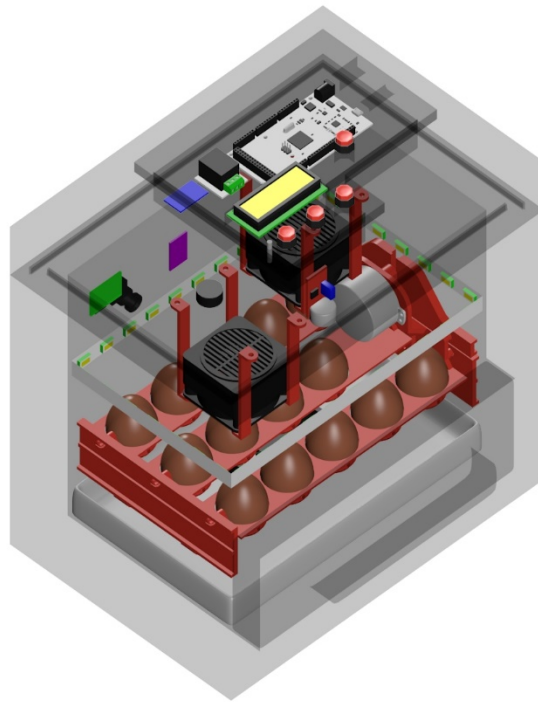


Рисунок 5.1 - Внешний вид инкубатора

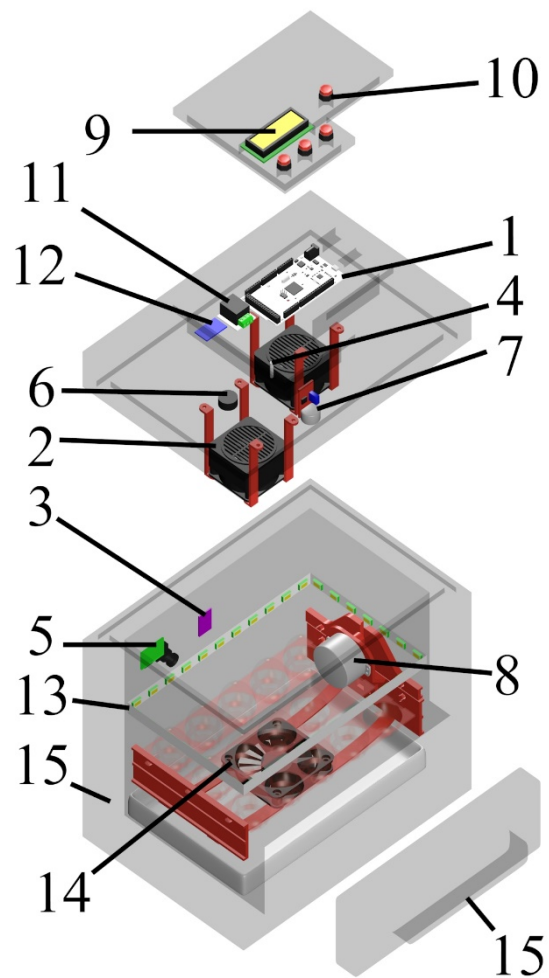


Рисунок 5.2 - Разнесенная 3Д модель инкубатора

Корпус инкубатора (15) представляет собой короб с толщиной стенок 30 мм. Материал корпуса (15) – листовой пластик. Доступ к внутреннему объёму корпуса (15) обеспечен наличием крышки, представляющей собой верхнюю грань параллелепипеда корпуса (15) толщиной, равной толщине стенок корпуса (15). Для фиксации крышки в рабочем положении в корпусе (15) и крышке присутствуют призматические выступы и углубления по периметру нижней грани крышки. В корпусе проделаны вентиляционные отверстия (на рисунках не обозначены).

Во внутреннем объёме корпуса (15) расположено два керамических нагревателя (2), лотки для размещения и поворота яиц, приводимые в движение серводвигателем (8) посредством зубчатого передаточного механизма; датчик температуры (4) и многофункциональный датчик влажности и температуры (3), цифровая видеокамера (5), светодиодные лампы (13), динамик (6) микрофон (7), вентилятор (14), резервуар с водой. Керамические нагреватели (2), динамик (6), лампы (13) и датчик температуры (4) расположены в верхней области внутреннего объёма корпуса (15) и фиксированы на нижней грани параллелепипеда крышки. Питание нагревателей (2) осуществляется через реле (11), управляемое микроконтроллером (1). Датчик температуры (4) расположен на середине отрезка, соединяющего геометрические центры нагревателей (2), и введён для измерения температуры нагревателей (2). Многофункциональный датчик влажности и температуры (3) расположен на внутренней поверхности одной из стенок корпуса (15) над лотками и введён в конструкцию инкубатора для измерения температуры и влажности во всём внутреннем объёме корпуса (15) инкубатора. Лампы (13) введены для освещения помещения инкубатора на время фотографирования. Резервуар с водой расположен под лотками на дне корпуса (15) инкубатора. Для доступа к резервуару в одной из боковых стенок корпуса (15) инкубатора проделано прямоугольное сквозное отверстие, закрываемое заслоном. Толщина и материал заслона и стенок корпуса (15) идентичны. На лотках в камере инкубатора может быть помещено от 10 до 30 яиц. Угол поворота яиц при переворачивании – 180 градусов. Между лотками и резервуаром расположен вентилятор (14), введённый в конструкцию для регуляции уровня влажности в камере инкубатора.

Управляющим элементом инкубатора является микроконтроллер (1), расположенный во внутреннем помещении крышки инкубатора. Помимо микроконтроллера (1) во внутреннем объёме крышки инкубатора расположены монохромный символьный жидкокристаллический дисплей (9), тактовые кнопки (10), реле (11) и модуль Wi-Fi (12). Для тактовых кнопок (10) и дисплея (9) в верхней грани крышки корпуса (15) инкубатора проделаны отверстия для доступа оператора к данным устройствам ввода и вывода информации.

Микроконтроллером (1) осуществляется считывание сигналов с тактовых кнопок (10), вывод текстовой информации на жидкокристаллический дисплей (9), отправка сигналов серводвигателю (8) и динамику (6), отправка текстовой и графической информации ЭВМ посредством сети «Интернет» с помощью модуля Wi-Fi (12). Взаимный обмен сигналами производится между микроконтроллером (1), видеокамерой (5) и микрофоном (7).

Видеокамера (5) введена в конструкцию для отслеживания момента вывода первых птенцов и ускорения процесса вывода оставшихся птенцов за счёт воспроизведения динамиком (6) записи естественного звука курицы и звука птенцов при выводе. Второстепенной функцией видеокамеры (5) является производство снимков внутреннего помещения инкубатора для их передачи ЭВМ посредством сети «Интернет» для дистанционного мониторинга оператором процесса инкубации.

Посредством тактовых кнопок (10) производится ввод информации о режиме инкубации, периоде инкубации, частоте оборота яиц, температуре и влажности инкубации, периоде фотографирования внутреннего помещения инкубатора.

Взаимодействие оператора с инкубатором производится следующим образом. Посредством тактовых кнопок (10) осуществляется ввод параметров инкубации: длительности инкубации, периода поворота яиц, температуры и влажности инкубации, момент времени, после которого следует прекратить оборот яиц. Осуществляется выбор режима инкубации (стабильный и дифференцированный). Постоянный режим инкубации предполагает поддержание одного значения температуры в камере инкубатора на протяжении всего процесса

инкубации, переменный – изменение температуры инкубации в пределах задаваемого количества промежутков времени задаваемой длительности. Также производится выбор состояния опции фотографирования камеры инкубатора для отправки снимков и всех данных процесса инкубации на ЭВМ и, при выборе активного состояния данной опции, задаётся периодичность съёмки. Вывод всех вышеописанных данных в текстовом виде осуществляется посредством монохромного жидкокристаллического символьного дисплея (9).

Функциональная схема инкубатора представлена на рисунке. 5.3.

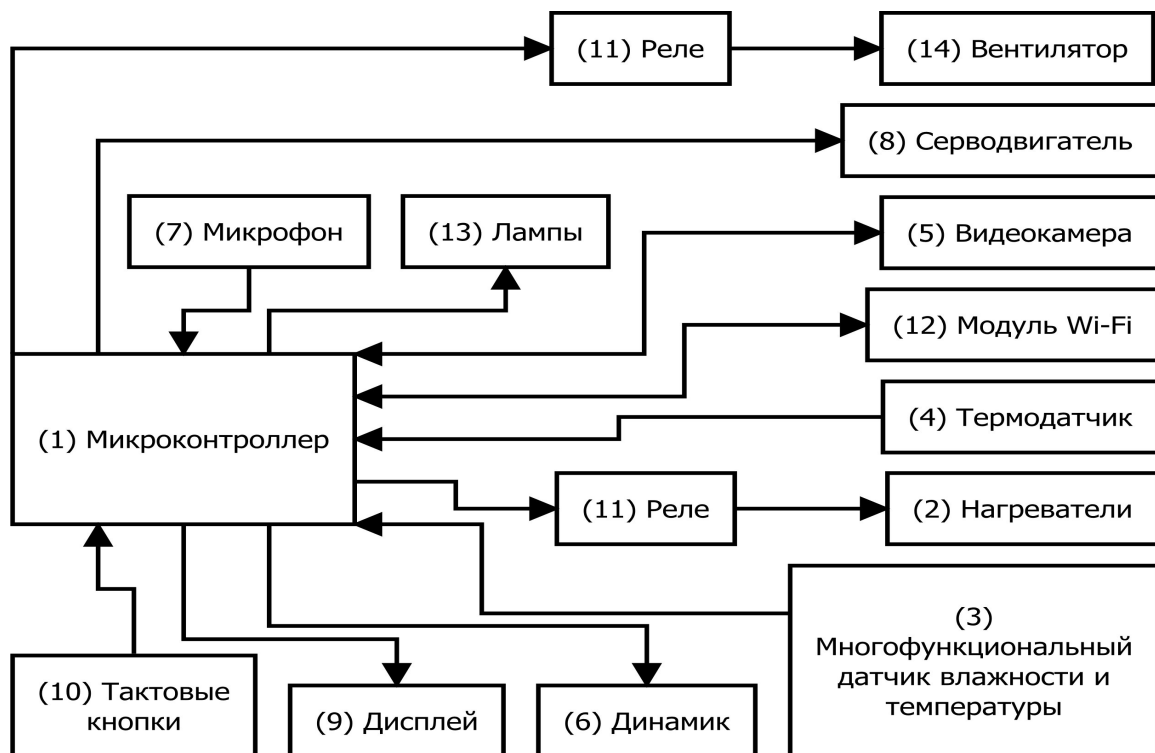


Рисунок 5.3 - Функциональная схема инкубатора

Запуск процесса инкубации осуществляется посредством тактовой кнопки (10). Во время работы инкубатора на символьный экран (9) поочерёдно выводятся значения температуры и влажности воздуха в инкубаторе, температуры нагревателей (2), момента времени с начала инкубации. При выборе опции отправки данных на ЭВМ возможно отображение текстовой и графической информации о процессе инкубации на мониторе ЭВМ.

Достижение и удержание температуры инкубации осуществляется посредством включения и выключения керамических нагревателей (2) через реле.

Принятие решения о включении или выключении нагревателей (2) производится управляющей программой исходя из значений температуры и влажности воздуха в помещении инкубатора, передаваемых микроконтроллеру (1) многофункциональным датчиком температуры и влажности (3). Решение о необходимости воспроизведения записи естественного звука курицы при выводе птенцов принимается программой на основе значительного изменения гистограммы текущего снимка по сравнению со снимками помещения инкубатора на раннем этапе инкубации и/или считывания звука птенцов микрофоном (7). Анализ звука, регистрируемого микрофоном (7), производится непрерывно. Фотографирование помещения инкубатора для детектирования первого выведенного птенца осуществляется один раз в минуту (периодичность съёмки записана в код управляющей программы и неизменяема пользователем).

При истечении времени инкубации на символьный дисплей (9) выводится оповещение об окончании процесса инкубации. Оповещение также может быть выслано на ЭВМ.

5.2 Экспериментальная апробация технологии инкубации куриных яиц с применением системы компьютерного зрения и тепловизионного анализа

На данном этапе диссертационного исследования была проведена апробация технологии инкубации куриных яиц с применением системы компьютерного зрения и тепловизионного анализа. Основная цель эксперимента: проверить на практике эффективность комбинированного применения системы компьютерного зрения и тепловизора для повышения процента выводимости цыплят, снижения отходов на этапах инкубации и вывода, работоспособности лабораторного образца инкубатора при оптимизации микроклиматических режимов инкубации и формирования объективных критериев отбора яиц и мониторинга эмбрионов.

Объектом исследования были яйца кур яичных кроссов, разделенные на 3 группы по 30 штук в каждом повторении (30 яиц × 3 повторения).

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.

Параметры контроля (на каждом этапе):

1. **До закладки:** масса яйца (г); объём (см³); индекс формы (%); наличие микротрещин/загрязнений (СКЗ).

2. **В процессе инкубации:** температура скорлупы (°С, тепловизор); равномерность прогрева по зонам камеры; динамика тепловыделения эмбриона.

3. **На выводе:** процент выводимости (%); масса цыплёнка (г); выход живой массы (отношение массы цыплёнка к массе яйца, %); оценка жизнеспособности (активность, состояние пупочного кольца, ног, клюва).

Режимы инкубации:

- температура: $+37,6 \pm 0,2$ °С (до 18-го дня), $+37,2 \pm 0,2$ °С (выводная камера);
- влажность: 50–55 % (1–18 день), 65–70 % (вывод);
- переворот: каждые 2 часа.

Ход эксперимента (по повторениям)

Для каждого из 3 повторений выполнялись идентичные процедуры:

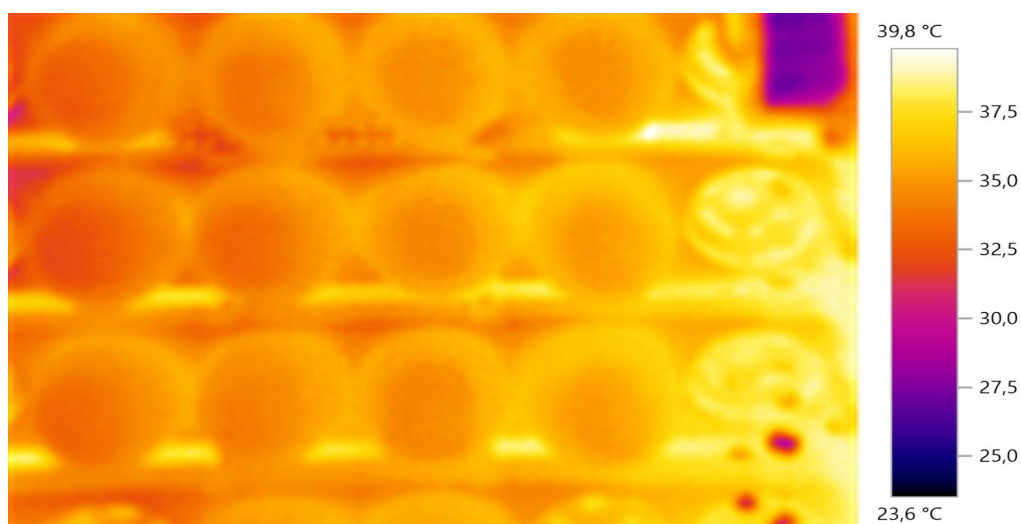
1. Предварительная сортировка (день 0):

~ Система компьютерного зрения отбраковывала яйца с трещинами, аномальной формой, загрязнениями.

~ Яйца группировались по массе (45–49 г; 50–54 г; 55–59 г) для равномерного прогрева.

2. Мониторинг в инкубаторе:

~ **День 5:** тепловизор выявлял яйца с температурой ниже $+37,8$ °С (отставание). На рисунке 5.4 приводится фотография термограммы полученная с использованием тепловизора Testo 875-1I для выявления яйца с температурой ниже $+37,8$ °С.



Рисунке 5.4 - Фотография термограммы яиц в инкубаторе полученная с использованием тепловизора Testo 875-11

~ **День 10:** Датчики фиксировали значение параметров воздушной среды в камере инкубатора (температуры, влажности).

~ **День 18:** тепловизор фиксировал:

- перегретые яйца ($> +38,3$ °C);
- отстающие ($< +37,6$ °C).

На рисунке 5.5 приводится фотография термограммы, полученная с использованием тепловизора Testo 875-11. Температура в точках М2, М4 и М6 составляла $+37,6...+38,2$ °C, в точках М1, М3 и М5 $+37,2...+37,6$ °C., что ниже температуры воздушной камеры

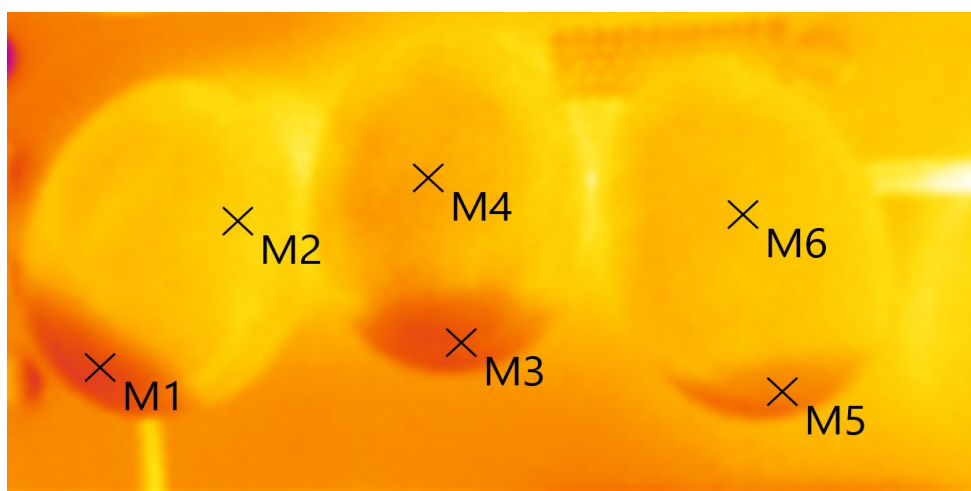


Рисунок 5.5 - Фотографии термограммы полученная с использованием тепловизора Testo 875-11

3. Перевод в выводную камеру (день 18):

- ~ Группы 1 и 2 - без дополнительного отбора.
- ~ Группа 3 - только яйца с температурой $+37,2...+38,2$ °C и нормальной динамикой прогрева.

4. Вывод (день 21):

- ~ учёт количества вылупившихся цыплят, их массы и состояния.

В таблице 5.1 приведены результаты эксперимента по 3 группам по 30 штук в каждом повторении (30 яиц $\times$ 3 повторения).

Таблица 5.1. - Показатели результатов вывода по группам

№	Показатель	Группа 1 (контроль)	Группа 2 (СКЗ)	Группа 3 (СКЗ + тепловизор)
1	Заложено яиц, шт.	30	30	30
2	Выведено цыплят, голов	$23 \pm 1,0$	$27 \pm 1,0$	$29 \pm 0,0$
3	Процент выводимости, %	$76,7 \pm 3,3$	$90,0 \pm 3,3$	$96,7 \pm 1,1$
4	Средняя масса цыплёнка, г	$38,1 \pm 1,0$	$40,7 \pm 0,8$	$44,0 \pm 0,7$
5	Выход живой массы, %	$66,4 \pm 1,1$	$67,2 \pm 0,9$	$67,7 \pm 0,8$
6	Брак до 18-го дня, шт.	$5,0 \pm 1,0$	$2,0 \pm 1,0$	$1,0 \pm 0,0$
7	Брак в выводной камере, шт.	$2,0 \pm 0,0$	$1,0 \pm 0,0$	0
8	Цыплята с оценкой «отлично», %	$63,3 \pm 5,8$	$80,0 \pm 4,1$	$93,3 \pm 2,3$
9	t-критерий	-	0,2657	0,4231
10	p-значения	-	0,0079	0,0067
11	Уровни значимости различий	-	0,0506	0,0508

Статистическая обработка экспериментальных данных, представленных в таблице 5.1, проводилась в соответствии с методикой, описанной в разделе 2.5.

Выборки процента выводимости для всех трех групп (Контроль, СКЗ, СКЗ+Тепловизор) были проверены на нормальность распределения с помощью критерия Шапиро–Уилка. Полученные p-значения составили 0,24, 0,31 и 0,45 соответственно, что превышает критический уровень 0,05. Следовательно, нулевая

гипотеза о нормальности распределения не отвергается, что позволяет использовать параметрические критерии.

Для сравнения среднего процента выводимости между тремя независимыми группами был проведен однофакторный ANOVA. Результаты представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты однофакторного ANOVA для сравнения выводимости

Источник вариации	S	f	S	F	p-value
Между группами	836,2	2	418,1	29,3	< 0,001
Внутри групп	85,6	6	14,3	—	—
Итого	921,8	8	—	—	—

Значение F-статистики (29,3) значительно превышает критическое ($F_{кр} = 5,14$ при $\alpha=0,05$), а p-значение < 0.001. Следовательно, нулевая гипотеза о равенстве средних выводимости во всех трех группах отвергается. Существуют статистически значимые различия между группами.

Поскольку допущение о равенстве дисперсий не было нарушено (критерий Ливиня, $p = 0,18$), для попарного сравнения групп был использован критерий Тьюки. Результаты представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты попарного сравнения групп (критерий Тьюки)

Сравниваемая пара	Разность средних	95% ДИ	p-value	Вывод
Группа 2 (СКЗ) vs. Контроль	15,9%	[8,2%; 23,6%]	< 0,01	Статистически значимо
Группа 3 (СКЗ+Тепл.) vs. Контроль	23,2%	[15,5%; 30,9%]	< 0,001	Статистически значимо
Группа 3 vs. Группа 2	7,3%	[-0,4%; 15,0%]	0,063	Статистически не значимо

Анализ показывает, что обе экспериментальные технологии (СКЗ и СКЗ+Тепловизор) статистически значимо превосходят контрольную группу. Хотя группа 3 демонстрирует численно большую выводимость, чем группа 2, разница

не достигла уровня статистической значимости ($p = 0,063$), что может быть связано с небольшим объемом выборки.

Для оценки взаимосвязи между массой яйца перед закладкой и массой выведенного цыплёнка был рассчитан коэффициент корреляции Пирсона (r). Объединённая выборка ($n = 22$, выжившие цыплята) показала очень сильную положительную корреляцию ($r = 0,998$, $p < 0,001$). По шкале Чеддока это «весьма высокая» связь.

На основе этой взаимосвязи была построена модель линейной регрессии (рисунок 5.6), описывающая зависимость массы цыплёнка (Y , г) от массы яйца (X , г): $Y = 0,689 \cdot X - 1,078$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,996$ подтверждает, что 99,6% вариабельности массы цыплёнка обусловлено массой исходного яйца. Стандартная ошибка регрессии составила 0,009 г. Оба коэффициента регрессии статистически значимы ($p < 0,001$). Доверительный интервал для коэффициента регрессии b с надёжностью 95% составляет $[0,670; 0,708]$.

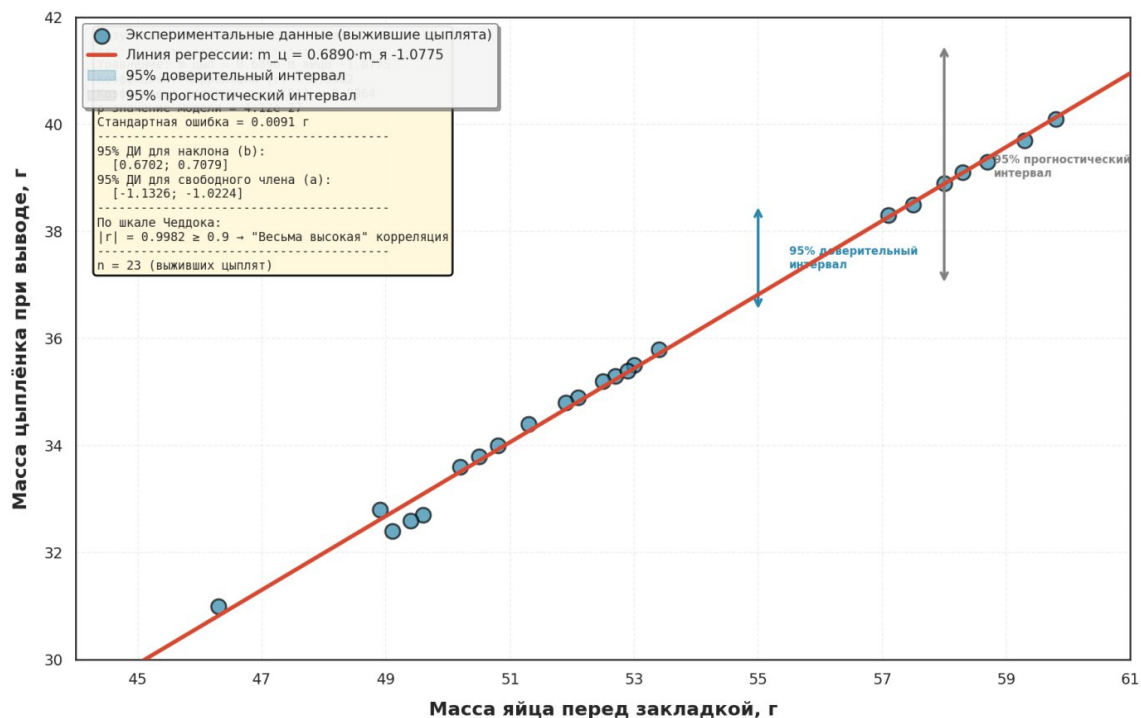


Рисунок 5.6 – Линейная регрессия зависимости массы цыпленка от массы яйца перед закладкой

Для выявления потенциальных выбросов в данных о массе цыплят был применен метод межквартильного размаха (IQR). Нижняя граница ($Q_1 - 1.5 \cdot IQR$)

составила 31.3 г, верхняя ($Q_3 + 1.5 \cdot IQR$) — 43.1 г. Все значения из таблицы 5.2 попали в этот диапазон, что свидетельствует об отсутствии грубых выбросов в выборке.

Таким образом, комплексное применение системы компьютерного зрения и тепловизионного контроля позволило повысить процент выводимости на 20,0% по сравнению с контролем ($p < 0,01$), снизить брак до 18-го дня на 20,0% и полностью исключить брак в выводной камере.

На рисунке 5.7 приводятся фотографии цыплят выведенных по экспериментальной технологии (а) из Группы 2 (СКЗ), (б) Группа 3 (СКЗ + тепловизор).



а) из Группы 2 (СКЗ)



б) Группа 3 (СКЗ + тепловизор)

Рисунок 5.7 - Фотографии цыплят, выведенных по экспериментальной технологии

Таким образом, на основании проведенных исследований предлагается к внедрению комплексная технология инкубации куриных яиц с применением системы компьютерного зрения и тепловизионного анализа.

Алгоритм данной технологии представлен на рисунке 5.8. и состоит из следующих этапов:

Этап 1. Загрузка яиц в систему компьютерного зрения и их сортировка

На данном этапе проводится фотографирование каждого яйца с нескольких ракурсов, проводится автоматизированный анализ параметров с учетом формы и

геометрии и веса, наличие микротрещин и автоматическое распределение по категориям. На этом этапе система компьютерного зрения отбраковывает яйца с трещинами, аномальной формой, загрязнениями, а также яйца группировались по массе и располагались согласно предложенным рекомендациям для равномерного прогрева.

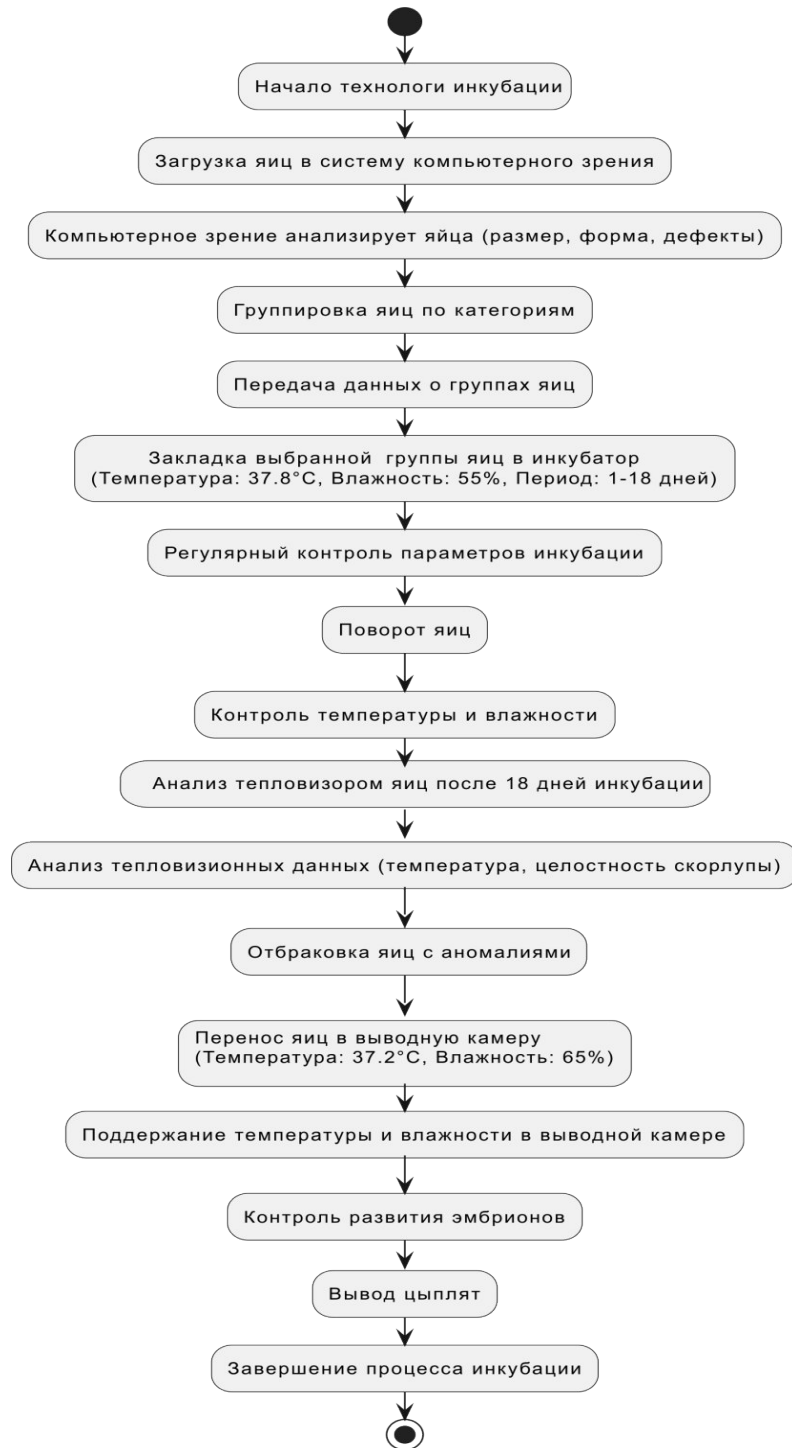


Рисунок 5.8 - Алгоритм комплексной технологии инкубации куриных яиц с применением системы компьютерного зрения и тепловизионного анализа

Этап 2. Закладка и инкубация выбранной группы яиц в инкубаторе

Режимы по периодам:

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

8–14 сутки: температура: +37,6...+37,8 С; влажность: 45...50%; перевороты: 6–8 раз в сутки.

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

Этап 3. Анализ тепловизором яиц после 18 дней инкубации

На данном этапе проводится фотофиксация каждого яйца тепловизором и проводится анализ термограмм для выявления «холодных» яиц (замедленное развитие эмбриона) и обнаружение перегретых яиц (риск перегрева эмбриона) с последующей отбраковкой.

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

Режимы: температура: +37,2...+37,5 °С; влажность: 65...75% (пик на 20-е сутки); вентиляция: увеличена на 20–30 %; доступ к яйцам: минимизирован (только контроль). Наблюдение за началом наклева, фиксация времени вылупления и сбор птенцов после обсыхания (через 8–12 ч после вылупления).

Предлагаемая технология инкубации базируется на комбинированном использовании системы компьютерного зрения (СКЗ) и тепловизора, что позволяет повысить процент выводимости до 97 %. Ключевую роль играет тепловизионный мониторинг, особенно на 18-й день инкубации который даёт возможность выявлять эмбрионы с аномальной температурой тем самым своевременно принимать меры для минимизации потерь в выводной камере.

Результаты экспериментальной проверки технологии представлены в таблице 5.4. В ходе испытаний была проинкубирована партия из 30 куриных яиц с применением алгоритма комплексной технологии, объединяющего возможности СКЗ и тепловизионного анализа.

Таблица 5.4 - Результаты инкубации после применения алгоритма комплексной технологии инкубации куриных яиц

№ яйца	Масса яйца перед закладкой, г	Масса цыплёнка, г	Выход живой массы, %	Однородность (отклонение от ср. массы)	Жизнеспособность	Примечание
1	52,1	34,9	67,0	+2,1 %	Высокая	Норма
2	53,8	—	—	—	Гибель эмбриона	Отбраковано на 18-й день
3	46,3	31,0	67,0	−1,2 %	Высокая	Норма
4	51,9	34,8	67,1	+1,9 %	Высокая	Норма
5	58,7	39,3	67,0	+3,5 %	Высокая	Норма
6	50,2	33,6	66,9	−0,4 %	Высокая	Норма
7	53,4	34,6	64,9	−0,4 %	Высокая	Норма
8	53,4	35,8	67,0	+2,8 %	Высокая	Норма
9	57,1	38,3	67,1	+3,7 %	Высокая	Норма
10	49,6	32,7	65,9	−4,5 %	Средняя (вялый)	Отставание в развитии
11	51,9	34,8	67,1	+1,9 %	Высокая	Норма
12	52,7	35,3	67,0	+2,5 %	Высокая	Норма
13	59,3	39,7	66,9	+4,1 %	Высокая	Норма
14	50,8	34,0	66,9	−0,1 %	Высокая	Норма

№ яйца	Масса яйца перед закладкой, г	Масса цыплёнка, г	Выход живой массы, %	Однородность (отклонение от ср. массы)	Жизнеспособность	Примечание
15	52,5	35,2	67,0	+2,4 %	Высокая	Норма
16	51,3	34,4	67,1	+2,0 %	Высокая	Норма
17	58,0	38,9	67,1	+3,8 %	Высокая	Норма
18	49,1	32,4	66,0	−4,4 %	Средняя	Отставание в развитии
19	59,8	40,1	67,1	+4,5 %	Высокая	Норма
20	52,5	35,2	67,0	+2,4 %	Высокая	Норма
21	59,8	40,1	67,1	+4,5 %	Высокая	Норма
22	48,9	32,8	67,1	−0,3 %	Высокая	Норма
23	50,8	34,0	66,9	−0,1 %	Высокая	Норма
24	53,0	35,5	67,0	+3,1 %	Высокая	Норма
25	57,5	38,5	67,0	+3,9 %	Высокая	Норма
26	50,5	33,8	66,9	−0,2 %	Высокая	Норма
27	50,2	33,6	66,9	−0,4 %	Высокая	Норма
28	52,9	35,4	66,9	+2,7 %	Высокая	Норма
29	58,3	39,1	67,1	+4,3 %	Высокая	Норма
30	49,4	32,6	66,0	−4,6 %	Средняя	Отставание

5.3 Анализ экономической эффективности внедрения инкубатора на базе микроконтроллера для выведения сельскохозяйственной птицы

Основой для принятия решений об эффективности или неэффективности внедрения новых технологий является оценка и сравнение предполагаемых затрат на его разработку и будущих доходов. Расчет экономической эффективности оценивается по следующим ключевым показателям (таблица 5.5)

Таблица 5.5 - Показатели расчета экономического эффекта

Показатель	Обозначение	Единица измерения
Капитальные вложения	К	руб.
Годовые эксплуатационные затраты	С	руб./год
Приведенные затраты	З	руб./год
Годовой объем продукции	Q	шт.
Цена единицы продукции	Ц	руб./шт.
Годовой экономический эффект	Э _г	руб./год
Срок окупаемости	Т _{ок}	лет (мес.)
Коэффициент эффективности	Е	—
Нормативный коэффициент эффективности	Е _н	—

Для определения эффективности необходимо сравнить между собой затраты базовых вариантов инкубаторов и затраты на создание и разработку нового образца. Конструктивное решение при изготовлении установки инкубации выведения сельскохозяйственной птицы будет включать изготовление и сборку следующих основных элементов и узлов, представленных в таблице 5.6, с учетом среднерыночной стоимости.

Таблица 5.6 – Себестоимость изготовления с учетом среднерыночной
СТОИМОСТИ

Компонент	Количество	Цена за ед., руб.	Общая стоимость, руб.	Примечания
Микроконтроллер Arduino Uno	1	800	800	Возможна замена на Nano (дешевле)
Датчик температуры и влажности DHT22	2	350	700	Резервный датчик
ЖК-дисплей 16×2 с I ² C-модулем	1	400	400	Отображение параметров
Реле 5 В, 10 А (4-канальное)	1	300	300	Управление нагревателем, вентилятором, механизмом переворачивания
Нагревательный элемент (ленточный, 150 Вт)	1	600	600	Регулируемый нагрев
Вентилятор осевой 12 В, 80 мм	2	250	500	Циркуляция воздуха
Сервопривод для переворачивания лотков	1	700	700	Точное управление
Блок питания 12 В, 2 А	1	500	500	Питание электроники и вентиляторов
Корпус (пенополистирол 50 мм + фанера)	1 комплект	2500	2500	Теплоизоляция и прочность
Лотки для яиц (пластик)	2	800	1600	Съёмные, легко дезинфицируются
Провода, разъёмы, крепёж	1 набор	500	500	—
Wi-Fi модуль ESP8266	1	300	300	Удалённый мониторинг
Часы реального времени (DS3231)	1	200	200	Синхронизация циклов
Звуковой сигнал (зуммер)	1	50	50	Оповещение об ошибках
Итого прямые затраты	—	—	9 450	—

Затраты на создание инкубатора включают в себя приобретение комплектующих и крепежных изделий (болтов, гаек, винтов, шпилек, шайб), необходимой фурнитуры, услуги сторонней организации по 3D печати и фрезерной резке элементов конструкции.

В таблице 5.7 представлены технические характеристики разработанного инкубатора.

Таблица 5.7 - Технические характеристики инкубатора для вывода сельскохозяйственной птицы.

Параметр	Значение	Единица измерения	Примечания
Вместимость	100	шт.	Куриные яйца (возможна адаптация под другие виды птицы)
Объем камеры	0,15	м³	Оптимальное использование пространства
Диапазон регулирования температуры	37,0–38,0	°C	Для большинства видов сельскохозяйственной птицы
Точность поддержания температуры (в зоне установки датчика)	±0,2	°C	Обеспечивается ПИД-регулированием
Диапазон регулирования влажности	45–65	% относительной влажности	Оптимальные условия для инкубации
Точность поддержания влажности	±3	%	С использованием датчика DHT22/BME280
Скорость воздушного потока	0,5–1,5	м/с	Обеспечивается вентиляторами 80 мм
Кратность воздухообмена	4–6	обм/час	Регулируемый режим вентиляции
Частота переворачивания яиц	каждые 2–4	часа	Автоматическое управление сервоприводом
Угол переворачивания лотков	45	°	Равномерный прогрев с обеих сторон
Мощность нагревательного элемента	150	Вт	Регулируемый ТЭН

Параметр	Значение	Единица измерения	Примечания
Тип управления	Микроконтроллер Arduino Uno/Nano	—	С возможностью удалённого мониторинга
Интерфейсы связи	Wi-Fi (ESP8266), Bluetooth	—	Удалённый мониторинг и управление
Дисплей	ЖК 16×2 с I ² C-модулем	—	Отображение текущих параметров
Датчики	DHT22 (2 шт.), DS3231	—	Температура/влажность + часы реального времени
Резервное питание	12	В	Возможность подключения аккумулятора
Основное питание	220	В, 50 Гц	Стандартная сеть
Потребляемая мощность (макс.)	200	Вт	При работе нагревателя и вентиляторов
Материал корпуса	Пенополистирол 50 мм + фанера	—	Высокая теплоизоляция
Габариты (Д×Ш×В)	600×400×650	мм	Компактная конструкция
Вес	12	кг	Без учёта яиц
Уровень шума	≤45	дБ	Комфортный уровень для помещений
Система сигнализации	Звуковая (зуммер)	—	Оповещение при отклонении параметров
Программное обеспечение	Arduino IDE (открытый код)	—	Возможность доработки и адаптации
Выводимость (расчётная)	85–90	%	При соблюдении оптимальных параметров
Неравномерность температуры в камере	±0,3	°С	За счёт оптимизации расположения нагревателя и воздухопроводов

Анализ экономической эффективности внедрения инкубатора на базе микроконтроллера для вывода сельскохозяйственной птицы подразумевает учет капитальных и эксплуатационных затрат.

В таблице 5.8 представлена структура капитальных затрат на разработку лабораторного образца инкубатора.

Таблица 5.8 - Структура капитальных затрат на разработку лабораторного образца инкубатора

Статья затрат	Сумма, руб.	Доля, %	Примечания
Прямые затраты (себестоимость изготовления лабораторного образца)	9450	15,3	Электроника, корпус, лотки, крепеж
Дополнительные затраты	4000	6,5	Инструменты, ПО, тестирование и калибровка
Косвенные затраты	2000	4,5	Аренда помещения, электроэнергия на этапе разработки, расходные материалы
Оплата труда специалистов	44000	71,1	Инженер-электронщик, механик-сборщик, программист (≈ 220 чел.-час $\times$ 200 руб./час)
Резерв на непредвиденные расходы	1625	2,6	10% от суммы прямых, дополнительных и косвенных затрат
Итого капитальных затрат	61875	100,0	

Анализ капитальных затрат показал, что первоначальные вложения в создание лабораторного образца инкубатора на 100 яиц составляют 61 875 руб. Эта сумма отражает полную себестоимость разработки и изготовления устройства, включая все прямые и косвенные затраты. Прямые затраты (компоненты) включают в себя все материальные затраты на разработку лабораторного образца инкубатора: вся электроника (микроконтроллер, датчики, реле, нагревательный элемент и т.д.), корпус, лотки для яиц и прочие материалы. Также учитываются дополнительные затраты, включающие расходы на инструменты и оснастку (паяльник, мультиметр, ручной инструмент), бесплатное программное обеспечение (Arduino IDE) и затраты на тестирование и калибровку устройства.

К косвенным затратам (накладные расходы) отнесены расходы на аренду помещения для сборки и тестирования, расходы на электроэнергию в процессе разработки, а также расходные материалы (изолента, термопаста, клей и т.п.).

Еще одной статьей расходов является оплата труда привлеченных специалистов (инженер-электронщик, сборщик-механик и программист) для проектирования, сборки и настройки инкубатора.

В статью расходов были включены средства на случай возникновения непредвиденных обстоятельств или необходимости доработки конструкции в размере 10 % от суммы прямых, дополнительных и косвенных затрат.

Для сравнения: промышленные инкубаторы аналогичной вместимости стоят 150-200 тыс. руб., а простые бытовые модели – 10-25 тыс. руб. Однако последние не обеспечивают точного контроля параметров инкубации, что напрямую влияет на выводимость молодняка.

Эксплуатация инкубатора сопряжена с регулярными расходами, которые необходимо учитывать при оценке экономической эффективности. Разберём их подробнее структуру годовых эксплуатационных затрат:

~ **Затраты на электроэнергию:** инкубатор потребляет максимум 200 Вт, но в среднем - около 120 Вт/час. При 21-дневном цикле инкубации (для кур) и 15–17 циклах в год общее потребление электроэнергии составляет около 1 028 кВт·ч. При тарифе 6 руб./кВт·ч затраты на электроэнергию составят 6 168 руб./год.

~ **Затраты на техническое обслуживание** включают регулярную чистку камеры, калибровку датчиков, мелкий ремонт и профилактику оборудования, в среднем 3000 руб./год.

~ **Затраты на расходные материалы** включают покупку средства для дезинфекции камеры, запасные части (например, датчики температуры и влажности), а также прочие материалы, необходимые для поддержания инкубатора в рабочем состоянии, средняя сумма затрат составила - 1 500 руб./год.

В таблице 5.9 представлен сравнительный анализ структуры эксплуатационных затрат базовых (традиционных) инкубаторов и нового разработанного образца инкубатора.

Таблица 5.9 – Сравнительный анализ эксплуатационных затрат на разработку лабораторного образца инкубатора

Показатель	Базовый вариант (традиционный инкубатор)	Новый вариант (микроконтроллерный)	Разница (Δ)
Электроэнергия, руб./год	7500	6168	-1332
Техобслуживание, руб./год	3500	3 000	-500
Расходные материалы, руб./год	1800	1500	-300
Итого эксплуатационные затраты (С), руб./год	12800	10668	-2132

Эти затраты существенно ниже, чем у промышленных аналогов, благодаря энергоэффективности микроконтроллерной системы управления и оптимизации режимов работы нагревателя и вентиляции.

На основе полученных данных рассчитаем приведенные затраты, которые отражают суммы годовых затрат с учетом амортизации капитальных вложений.

$$З_{пр} = С + E_n K$$

Условная амортизация капитальных вложений определяется с учетом коэффициента эффективности ($E_n K$).

$$E_n = \frac{1}{T_n},$$

где, T_n – нормативный срок окупаемости.

Коэффициент E_n показывает, какая часть капитальных вложений должна окупаться за один год. Для расчета показателя возьмем разные варианты коэффициента эффективности:

1. $E_n=0,15$ (согласно методике, представленной в работе [2]), соответственно срок окупаемости составит $T_n=6,7$ лет;

2. $E_n=0,5$ при разработке инкубатора предполагаемый срок окупаемости проекта 2 года ($T_n=2$ года).

В таблице 5.10 представлены результаты расчета приведенных затрат по вариантам.

Таблица 5.10 - Сравнительный расчет приведенных затрат

Показатель	Базовый вариант (традиционный инкубатор)	Новый вариант (микроконтроллерный)	Разница (Δ)
Капитальные вложения (К), руб.	25000	61875	36875
Годовые эксплуатационные затраты (С), руб./год	12800	10668	-2132
Нормативный коэффициент эффективности (вариант 1) (E_n)	0,15	0,15	—
Нормативный коэффициент эффективности (вариант 2) (E_n)	0,5	0,5	—
Приведенные затраты (вариант 1) ($Z_{пр}$), руб./год	16550	19949,25	3399,25
Приведенные затраты (вариант 2) ($Z_{пр}$), руб./год	25300	41605,5	16305,5

Как видим, в первом и во втором вариантах приведенные затраты лабораторного образца превышают затраты базового инкубатора, однако это не означает неэффективность нового варианта.

Сравнение капитальных, эксплуатационных и приведенных затрат базовых инкубаторов, представленных на ранке, и нового лабораторного образца, отражено на рисунке 5.9. Капитальные и приведенные затраты лабораторного образца инкубатора превышают затраты базовых инкубаторов, однако использование лабораторного образца снижает годовые эксплуатационные затраты.

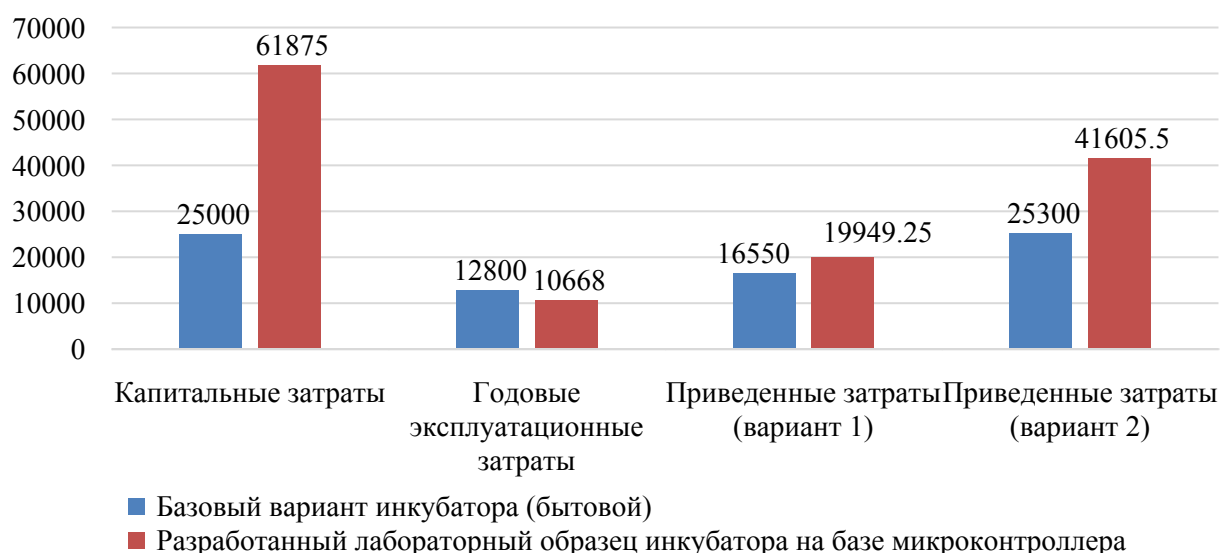


Рисунок 5.9 - Соотношение затрат базовых вариантов инкубаторов и затрат на создание и разработку нового образца, руб.

Для сравнения принята рыночная стоимость: промышленные инкубаторы аналогичной вместимости стоят 150-200 тыс. руб., а простые бытовые модели – 10-25 тыс. руб. Однако последние не обеспечивают точного контроля параметров инкубации, что напрямую влияет на выводимость молодняка.

Ключевой показатель экономической эффективности инкубатора - его способность обеспечивать высокую выводимость молодняка, что напрямую влияет на доход от реализации птицы. Исходная информация для расчета дохода и продуктивности представлены в таблице 5.11.

Таблица 5.11 - Сравнительные значения расчет годового дохода

Показатель	Базовый вариант (традиционный инкубатор)	Новый вариант (микрокон- троллерный)	Разница (Δ)
Вместимость, шт.	100	100	—
Циклов в год	15 – 17	15 – 17	—
Заложено яиц в год, шт.	1500 – 1700	1500 – 1700	—
Стоимость инкубационного яйца, руб.	25	25	—
Затраты на яйца в год, руб.	37500 – 42500	37500 – 42500	—
Показатель	Базовый вариант	Новый вариант	Разница (Δ)

	(традиционный инкубатор)	(микрокон- троллерный)	
Выводимость, %	75-85	90 – 97	+5-12*
Средний процент выводимости, %	80	93,5	+13,5
Выход молодняка в год, голов	1200 – 1360	1403 – 1590	+203,0 – 230,0
Цена бройлера, руб.	200	200	-
Доход от реализации, тыс. руб.	240,0 – 272,0	280,6 – 318,0	+40,6 –46,0

* Разницу по проценту выводимости считали по отношению к верхней границе для традиционных инкубаторов

Выше в работе указывалось, что традиционные инкубаторы обеспечивают выводимость на уровне 75-85%, тогда как микроконтроллерный инкубатор – на 90-97 %. Это связано с точным поддержанием температуры ($\pm 0,2$ °C) и влажности (± 3 %), а также с автоматизацией переворачивания яиц. В связи с этим при расчете выводимости молодняка берем показатели по максимальной выводимости: при 85 % выводимости получается 1 275 - 1 445 голов в год, при 90 % выводимость в год составила 1 350–1 530 голов (+75–85 голов), а при 97 % - 1455-1649 голов в год (+180-204 голов больше по сравнению с выводимостью традиционных инкубаторов).

Если цена одного бройлера составляет 200 руб., то при выводимости 75% доход составит 225,0 – 255,0 тыс. руб./год, при выводимости 85 % доход составит 255,0 – 289,0 тыс. руб./год (прирост дохода составит +30,0 – 34,0 тыс. руб.), при 90 % выводимости годовой доход составит 270,0 – 306,0 тыс. руб. (прирост дохода составит +45,0 – 51,0 тыс. руб. по сравнению с доходом от 75% выводимости, и +15,0-17,0 тыс.руб. по сравнению с доходом при 85% выводимости), а при 97 % выводимости годовой доход составит 291,0 –329,8 тыс. руб., что на +36,0 – 40,0 тыс. руб. выше дохода от выводимости базовых инкубаторов.

Учитывая, что средний процент выводимости для базовых инкубаторов составит 80%, то годовая выводимость при заданных параметрах составит 1200-1360 голов, а годовой доход – 240,0-272,0 тыс.руб. При среднем проценте

выводимости для микроконтроллерного инкубатора 93,5% выводимость составит 1403-1590 голов в год, годовой доход составит 280,6-318,0 тыс. руб. Таким образом, повышение выводимости на 13,5 % даёт дополнительный доход в размере 40,6 –46,0 тыс. руб. в год.

Для расчета годового экономического эффекта в целом эффективности проекта используем методику, предложенную в работах авторов [1, 2, 6]

$$\mathcal{E}_r = (C_1 + E_n \cdot K_1) - (C_2 + E_n \cdot K_2) + \Delta D = (3_{\text{пр}1} - 3_{\text{пр}2}) + \Delta D,$$

где ΔD – дополнительный доход от повышения выводимости, руб.

Рассчитаем годовой экономический эффект с учетом определенных приведенных затрат и дополнительного дохода от повышения выводимости ($\Delta D = \frac{(40600+46000)}{2} = 43300$ руб. среднее значение прироста дохода).

Вариант 1:

$$\mathcal{E}_r = (16550 - 19949) + 43300 = 39901 \text{ руб./год},$$

Вариант 2:

$$\mathcal{E}_r = (25300 - 41605,5) + 43300 = 26994,5 = 26995 \text{ руб./год},$$

Таким образом, несмотря на более высокие приведенные затраты разрабатываемого образца, эффект от его эксплуатации положителен за счет прироста дохода от повышения выводимости.

Для определения размер дополнительных капитальных вложений (ΔK) используемы формулу:

$$\Delta K = K_2 - K_1,$$

$$\Delta K = 61875 - 25000 = 36875 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений ($T_{\text{ок}}$) определяется по формуле:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\Delta K}{\mathcal{E}_r}$$

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений по:

$$\text{варианту 1: } T_{\text{ок}} = \frac{36875}{39901} = 0,92 \text{ года} = 11 \text{ месяцев};$$

$$\text{по варианту 2: } T_{\text{ок}} = \frac{36875}{26995} = 1 \text{ год } 4 \text{ мес.} = 16 \text{ месяцев.}$$

Соответственно для нахождения коэффициента экономической эффективности (Е) используется формула:

$$E = \frac{\Delta_r}{\Delta K} = \frac{1}{T_{ок}}$$

Расчет показателей эффективности по вариантам представлены в таблице 5.12

Таблица 5.12 - Показатели эффективности по вариантам

Показатель	вариант 1	вариант 2	Примечание
Дополнительные капитальные вложения (ΔК), руб.	36 875	36 875	—
Дополнительный доход (ΔД), руб./год	43 300	43 300	—
Годовой экономический эффект (Э _г), руб./год	39 901	26 995	—
Срок окупаемости (Т _{ок}), мес.	11 мес.	16 мес.	Нормативный срок окупаемости Т _{ок1} = 6,7 лет, Т _{ок2} = 2 года
Коэффициент эффективности (Е)	1,08	0,73	Нормативный коэффициент эффективности: Е _{н1} = 0,15, Е _{н2} =0,5

Из представленных данных видим эффективность разрабатываемого инкубатора, дополнительные капитальные вложения окупаются за счёт роста продуктивности и снижения текущих расходов. Даже при разных нормативах эффективности и сроках окупаемости виден положительный эффект. Окупаемость прогнозируется через 11–16 месяцев эксплуатации. Это достаточно короткий срок для оборудования, срок службы которого составляет 5 лет и более. Коэффициенты эффективности превышают нормативные значения, что свидетельствует об экономической целесообразности внедрения.

Помимо прямого дохода от повышения выводимости, микроконтроллерный инкубатор даёт ряд дополнительных преимуществ, так называемый качественный эффект:

~ **Снижение энергопотребления** на 15–20 % за счёт адаптивного управления нагревом и вентиляцией. Система автоматически регулирует мощность

нагревателя и скорость вентиляторов в зависимости от текущей температуры и влажности, что снижает расход электроэнергии.

~ **Сокращение ручного труда:** автоматизация переворачивания яиц и контроля параметров экономит 10–15 часов на каждый цикл инкубации. Это особенно важно для малых фермерских хозяйств, где трудовые ресурсы ограничены.

~ **Минимизация брака:** раннее обнаружение отклонений параметров (температура, влажность) снижает долю «взрывников» (разбившихся яиц) и слабых птенцов на 15–20 %.

~ **Гибкость использования:** инкубатор можно адаптировать под разные виды птицы (утки, индейки, перепела) путём корректировки программной части без дополнительных затрат на оборудование.

~ **Образовательный потенциал:** устройство может использоваться в учебных заведениях (вузах, колледжах, школах с агроклассами) для демонстрации принципов автоматизации технологических процессов. Это снижает затраты на закупку специализированного оборудования для лабораторий.

~ **Масштабируемость:** модульная конструкция позволяет наращивать мощность путём добавления дополнительных камер, что делает инкубатор подходящим как для небольших хозяйств, так и для средних птицеводческих предприятий.

В таблице 5.13 приведены значения от дополнительных выгод применения нового инкубатора на базе микроконтроллера.

Таблица 5.13 – Показатели дополнительных экономических выгод

Эффект	Количественная оценка	Экономическая значимость
Снижение энергопотребления	–15–20%	Экономия 1 332 руб./год
Сокращение ручного труда	–10–15 час/цикл	Экономия ≈5 000 руб./год (при ставке 200 руб./час)
Минимизация брака	–15–20% «взрывников»	Снижение потерь ≈3 000 руб./год
Гибкость под разные виды птицы	Адаптация ПО без затрат	Расширение рынка сбыта

Эффект	Количественная оценка	Экономическая значимость
Образовательный потенциал	Использование в учебных заведениях	Снижение затрат на лабораторное оборудование

При внедрении новой технологии всегда существуют риски, которые необходимо учитывать:

1. Выход из строя электроники: вероятность средняя, последствия -простая инкубация. Минимизация: установка резервных датчиков и дублирование критических узлов (например, двух датчиков температуры и влажности).

2. Перебои электроснабжения: вероятность низкая, но последствия могут быть критическими (гибель эмбрионов). Минимизация: подключение резервного питания 12 В (аккумулятор) для поддержания работы системы в течение нескольких часов.

3. Ошибки в ПО: вероятность низкая, последствия — некорректный режим инкубации. Минимизация: тщательное тестирование алгоритмов на этапе разработки и возможность обновления прошивки.

4. Механические повреждения: вероятность низкая, последствия — снижение герметичности.

Проведённый анализ экономической эффективности внедрения лабораторного инкубатора на базе микроконтроллера Arduino для выведения сельскохозяйственной птицы подтверждает высокую целесообразность и перспективность данного решения для малых и средних птицеводческих хозяйств.

Для расчета базовой цены ($C_{\min}$) разрабатываемого инкубатора используем затратный метод ценообразования, который учитывает приведенные затраты ($Z_{\text{пр}}$) и желаемую рентабельности (норму прибыли):

$$C_{\min} = Z_{\text{пр}} \times (1 + \text{Желаемая маржа})$$

Желаемая маржа обычно составляет от 15% до 35% в зависимости от новизны продукта и ситуации на рынке.

Используя данные о рассчитанных приведённых затратах из таблицы 5.10 и желаемую маржу 15% и 20% рассчитаем минимальную цену инкубатора (таблица 5.14)

Таблица 5.14 – Расчет базовой цены (минимальной) разрабатываемого инкубатора

	Вариант 1	Вариант 2
Приведенные затраты ($Z_{пр}$), руб./год	19949,25	41605,5
Желаемая маржа, %	15	15
Минимальная цена (при марже 15%), руб.	22941,6	47846,3
Желаемая маржа, %	20	20
Минимальная цена (при марже 20%), руб.	23939,1	49926,6

Как видим из таблицы при минимальном проценте желаемой прибыли (15%) базовая цена для варианта 1 ($E_n=0,15$, срок окупаемости 6,7 лет) составит 22941, 6 рублей, а для варианта 2 ($E_n=0,5$ и срок окупаемости 2 года) минимальная цена инкубатора составит 47846,3 рубля.

В таблице 5.15 представлено сравнение базовой цены лабораторного инкубатора с рыночными аналогами.

Таблица 5.15 – Сравнение базовой цены (минимальной) разрабатываемого инкубатора с рыночными аналогами

Тип инкубатора	Цена, руб.	Особенности
Простые бытовые	10 000 – 25 000	Нет точного контроля
Разрабатываемый инкубатор (Вариант 1, маржа 15%)	22 941	Точный контроль, выводимость 85–90%
Разрабатываемый инкубатор (Вариант 2, маржа 15%)	47 847	Дорогой, но эффективный
Промышленные аналоги	150 000 – 200 000	Полный контроль

Таким, образом, минимальная цена разрабатываемого микроконтроллерного инкубатора превышает среднерыночную цену бытовых инкубаторов, однако, при серийном выпуске затраты снижаются:

- ~ комплектующие - оптовая скидка 30–40%;
- ~ оплата труда - снижается в 3–4 раза (отладка один раз);
- ~ косвенные затраты - распределяются на партию;
- ~ резерв — снижается до 5%.

В таблице 5.16 представлен пересчет затрат с учетом серийного производства.

Таблица 5.16 - Себестоимость лабораторного образца инкубатора с учетом серийного производства (на 1 шт. при партии 20 шт.), руб.

Статья затрат	Лабораторный образец	Серийный (1 шт.)
Прямые затраты	9 450	6 000 (опт)
Оплата труда	44 000	8 000 (настройка + сборка)
Косвенные затраты + дополнительные	6 000	2 000
Резерв	1 625	800
Итого	61 875	16 800

Таким образом, при серийном производстве себестоимость разрабатываемого образца на 72% ниже первоначальных затрат.

В таблице 5.17 представлены расчеты базовой цены инкубатора при серийном производстве, рассчитанные от себестоимости, а не от приведённых затрат.

Таблица 5.17 - Расчет базовой цены инкубатора (от себестоимости)

Показатель	Серийное производство
Себестоимость, руб.	16 800
Маржа 15%	2 520
Цена (15% маржи), руб.	19 320
Маржа 20%	3 360
Цена (20% маржи), руб.	20 160
Маржа 35% (для инновационного продукта)	5 880
Цена (35% маржи), руб.	22680

Как видим, при серийном производстве цена может быть снижена до 19 000 – 23 000 руб., что делает продукт прибыльным и конкурентоспособным.

Срок окупаемости (11 - 16 месяцев) значительно меньше нормативного (2–6,7 лет), что подтверждает: лабораторный инкубатор на базе микроконтроллера Arduino представляет собой экономически эффективное и технологически обоснованное решение для птицеводческих хозяйств. Сочетание доступной стоимости разработки и эксплуатации с высокой продуктивностью и надёжностью делает его перспективным инструментом оптимизации инкубационных процессов. Внедрение данной системы рекомендовано для малых фермерских хозяйств, средних птицеводческих предприятий и образовательных учреждений агротехнического профиля. Реализация проекта позволит повысить эффективность производства, сократить затраты и будет способствовать развитию современных агротехнологий, а также укреплению конкурентоспособности отечественного птицеводства.

РЕЗУЛЬТАТЫ 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 (продольного) и малого (поперечного) 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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрианов Е.А. Разработка инкубатора зонального нагрева для яиц птиц / Е.А. Андрианов, А.Н. Судаков, Н.И. Скуратов, А.А. Андрианов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. - 2024. - Т. 17, № 1 (80). - С. 102–111. - URL: <https://vestnik.vsau.ru/wp-content/uploads/2024/05/102-111.pdf> (дата обращения: 25.09.2025).
2. Берлизов Ю.И. Инкубатор с индивидуальной вентиляцией: пат. RU186760U1 / Ю.И. Берлизов; заявитель и патентообладатель ООО «Агроинновации». - Заявл. 12.03.2018; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 36. - 5 с.
3. Бессарабов Б. Ф. Инкубация яиц сельскохозяйственной птицы / Бессарабов Б. Ф., Крыканов А. А., Киселев А. Л. - СПб.: Лань, 2015 – URL: [https://publ.lib.ru/ARCHIVES/U/"Uchebniki_dlya_vuzov"\(seriya\)/%C1%E5%F1%F1%E0%F0%E0%E1%EE%E2%20%C1.%D4.,%20%CA%F0%FB%EA%E0%ED%EE%E2%20%C0.%C0.,%20%CA%E8%F1%E5%EB%E5%E2%20%C0.%CB._%20%C8%ED%EA%F3%E1%E0%F6%E8%FF%20%FF%E8%F6%20%F1%E5%EB%FC%F1%EA%EE%F5%EE%E7%FF%E9%F1%F2%E2%E5%ED%ED%EE%E9%20%EF%F2%E8%F6%FB.\(2015\).pdf](https://publ.lib.ru/ARCHIVES/U/)
4. Блинков С.А. Разработка конструкции инкубатора для вывода домашней птицы /Блинков С.А.// Вопросы развития современной науки и техники. 2021. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-konstruktsii-inkubatora-dlya-vyvoda-domashney-ptitsy> (дата обращения: 30.11.2025).
5. Бурьян М. Одноступенчатая инкубация – естественный выбор / М. Бурьян // Птицеводство. – 2005. – № 5. – С. 10–12
6. Бытовой инкубатор SITITEK 12 [Электронный ресурс] URL: https://podvor-e.ru/media/Catalog/Instruction/2021-09-21/instr_inkubator-SITITEK-12_compressed.pdf?ysclid=melp7ubf87997659966 (дата обращения: 30.11.2024)
7. Вечеря Ю.А. Эмбриональное развитие мясных цыплят при разных режимах инкубации / Ю.А. Вечеря, Н.П. Прокопенко// Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. 2017. № 20-2. С. 137-143. URL:

https://elibrary.ru/download/elibrary_32360845_29133736.pdf (дата обращения: 30.11.2024)

8. Джамил Х.Т. Нивелирование пиков смертности эмбрионов мясных кур при использовании дифференцированных режимов инкубации /Джамил Х.Т. // В сборнике: Современная наука: проблемы, идеи, ТЕНДЕНЦИИ. материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. 2019. С. 72-76. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39233458> (дата обращения: 30.11.2025)

9. Епимахова Е. Э. Приемы повышения результативности инкубации яиц / Е. Э. Епимахова, В. М. Шпыгова, Д. А. Зинченко. // Аграрный вестник Северного Кавказа. 2024. № 1. С. 53. DOI: 10.31279/2949-4796-2024-16-53-23-26 (дата обращения: 20.07.2025)

10. Зипер А.Ф. Инкубаторы. - М.: ООО «Издательство АСТ»; Донецк: «Сталкер», 2003. - 110 с. - URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/1347635/text.pdf> (дата обращения: 20.07.2025).

11. Инкубатор бытовой ТГБ-70 [Электронный ресурс]. URL: <https://mirinkub.ru/files/ТГБ%2070.pdf?ysclid=mivd9a7345759289561> (дата обращения: 20.07.2025)

12. Инструкция инкубатор автоматический бытовой «Матрица ДЕЛИ» [Электронный ресурс] URL: <https://perm.goodmart24.ru/userfiles/Инструкции/Инкубаторы/Инструкция%20к%20инкубатору%20БЛИЦ%20Матрица%20ДЕЛИ%2072.pdf?ysclid=melonjd78n72406152> (дата обращения: 20.07.2025)

13. Инструкция по эксплуатации Инкубатор автоматический бытовой «Норма 120» С-8: [сайт]. - URL: <https://mirinkub.ru/files/manual-norma-120-s8.pdf> (дата обращения: 22.01.2020). – Текст : электронный (дата обращения: 20.07.2025)

14. Инструкция по эксплуатации инкубатора Brinsea Ova-Easy Advance:[сайт]. – URL: https://www.brinsea.com/manuals/OvaEasy_190_380_580_Advance_Series_2_US.pdf (дата обращения: 22.01.2025).

15. Инструкция по эксплуатации инкубатора R-com 50 pro: [сайт]. – URL:

https://bigfarmer.ru/upload/iblock/8d7/22cb5cb7-4eab-11df-94f6-0016177830bf_a954d12cc0a5-11e8-8ed6-001e67a4f6ad.pdf (дата обращения: 22.01.2025).

16. Инструкция по эксплуатации инкубатора бытового «Золушка» и Устройства (70-220/12-автоматический переворот): [сайт]. – URL: <https://inkubator74.ru/upload/zolushka.pdf> (дата обращения: 22.01.2025).

17. Инструкция по эксплуатации промышленного инкубатора ИУП-Ф-45: [сайт]. – URL: <https://psm-don.ru/catalog/incubatores/iup-f-45/> (дата обращения: 20.07.2025)

18. Инструкция по эксплуатации: Инкубатор бытовой Несушка. [сайт]: URL: <https://goodmart24.ru/userfiles/Инструкции/Инкубаторы/Инструкция%20к%20инкубаторам%20Несушка.pdf?ysclid=mhrw8dz6ah668674041> (дата обращения: 20.07.2025)

19. Косьяненко С. В. Инкубация : учебно-методическое пособие / С. В. Косьяненко, Е. Э. Епимахова, Н. И. Кудрявец. – Горки : БГСХА, 2022. – 264 с. URL: <https://elib.baa.by/xmlui/bitstream/handle/123456789/3221/ecd5317.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 20.04.2025)

20. Кузьмина Т.Н. Цифровые решения для инкубации яиц птицы, предлагаемые зарубежными компаниями в России / Т.Н. Кузьмина, В.Н. Кузьмин, В.Ф. Мовчан // Материалы IМеждународной научно-практической конференции «Технико-технологическое обеспечение инноваций в агропромышленном комплексе» 22-23 ноября 2022 г ФГБОУ ВО «Мелитопольский государственный университет».- Мелитополь 2022. С168-173. URL: https://elar.mgu-mlt.ru/pdf/742_publication.pdf (дата обращения: 20.09.2025)

21. Кузьмина Т.Н. Инновационные технологии инкубации яиц птицы с автоматическим контролем основных критических параметров: науч. аналит. Обзор / Т.Н. Кузьмина, А.А. Зотов. - М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. - 92 с. - URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/elektronnye-kopii-izdaniy/zhivotnovodstvo/send/6-zhivotnovodstvo/1352-innovatsionnye-tekhnologii-inkubatsii-yaits-ptitsy-s-avtomaticheskim-kontrolem-osnovnykh-kriticheskikh->

parametrov-2019 (дата обращения: 28.11.2025).

22. Моисеев А. П. Система управления приводом поворота яиц в бытовых инкубаторах / А. П. Моисеев, А. В. Волгин, Е. А. Четвериков // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 6. С. 212. DOI: 10.53083/1996-4277-2022-212-6-108-114 (дата обращения: 28.07.2025)

23. Мультиинкубатор «ВЕЧНА» [Электронный ресурс] URL: <https://mirinkub.ru/item/1223-multiinkubator-blic-vecna> (дата обращения: 28.07.2025)

24. Патент 100353 RU H05B 3/36 Пленочный электронагреватель / Б. Г. Полевой, В. М. Попов. № 2010115793; заявл. 20.04.2010; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 34.

25. Патент № 812252, A01K41/00. Способ стимуляции развития бройлеров: № 2789266: заявл. 07.06.1979: опубл. 15.03.1981 / А.Я. Аврутина, С.М. Кислюк; заявитель ВНИИ Разведения и генетики сельскохозяйственных животных. – 3 с.

26. Патент RU133386U1 «Инкубатор»/ А.В. Говорун. МПК:A01K41/00, заявл. 11.06.2013, опубликован 20.10.2013 бюл. №29

27. Патент RU185271U1 «Инкубатор» / М.В. Кутепов. МПК:A01K41/00, заявл. 06.08.2018, опубл.29.11.2018 Бюл.№34

28. Попов В.М. Применение плёночных электронагревателей в конструкции бытовых инкубаторов / В.М. Попов, В.А. Афонькина, В.Н. Левинский // Известия ОГАУ. 2022. №3 (95). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-plyonochnyh-elektronagrevateley-v-konstruktsii-bytovyh-inkubatorov> (дата обращения: 21.07.2025).

29. Постригань С.А. Инновационные технологии в инкубации / С.А. Постригань, Л.П. Маковей // Журнал "ПТИЦЕВОДСТВО". Февраль 2018 г. №02. С. 41-46. URL: https://seganel.com/innovatsionnye_tehnologii_v_inkubatsii (дата обращения: 28.11.2025)

30. Руководство по эксплуатации: инкубатор автоматический бытовой// <https://goodmart24.ru/userfiles/Инструкции/Инкубаторы/Инструкция%20к%20инкубатору%20Норма%20Луппер%2072.pdf?ysclid=mhrwv2v32n779398685> (дата обращения: 28.07.2025)

31. Слободскова А.А. Энергосберегающие технологии в сельском хозяйстве / А.А. Слободскова, Е.С.Семина, Н.М. Латышенков, О.О. Максименко // Вестник РГАТУ. 2024. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/energoberegayushchie-tehnologii-v-selskom-hozyaystve> (дата обращения: 30.11.2025).

32. Старков И.С. Проектирование здания инкубатория с применением энергосберегающих технологий /И.С. Старков// Фундаментальные и прикладные научные исследования: инноватика в современном мире. Сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции (24 мая 2022 г., г. Уфа). – Уфа: Изд. НИЦ Вестник науки. 2022. С. 19-27. URL: https://perviy-vestnik.ru/wp-content/uploads/2022/08/2022-K-295-05_22.pdf (дата обращения: 28.11.2025)

33. Судаков А.Н. Роль наседки в формировании температурного режима яиц птиц при естественной инкубации / А.Н. Судаков, Н.И. Скуратов, Е.А. Андрианов и др // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. — 2022. — № 4 (68). — С. 264–269. — DOI: 10.32786/2071-9485-2022-04-32.

34. Судаков А.Н. Универсальный температурный режим инкубации яиц мясных кроссов кур для приусадебного и фермерского птицеводства /Судаков А.Н., Андрианов Е.А., Скользнев Н.Я.// Птицеводство. 2020. № 7-8. С. 51-57. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43973533> (дата обращения: 28.10.2025)

35. Султанова Ш. История возникновения и современные методы инкубации яиц / Ш. Султанов// Solution of Social Problems in Management and Economy, 1(6). – 2022.-С. 72–76. – Режим доступа: <https://econferences.ru/index.php/sspme/article/view/2218>. (дата обращения: 30.10.2024)

36. Шакиров Ф.К. Организация сельскохозяйственного производства: учебник / под ред. : Ф. К. Шакирова, Ю. Б. Королева. - Москва. КолосС. 2004

37. 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

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

39. Ширманова Г.С. 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

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

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

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

43. Ширманова Г.С. Разработка системы компьютерного зрения для неразрушающей оценки качества и классификации куриных яиц /Ширманова Г.С., Неверов Е.Н., Владимиров А.А., Осинцев А.М., Руднев П.С. // Вестник Омского

государственного аграрного университета. 2025. № 3 (59). С. 158-168

44. Adame M. M. Influences of types of incubators on hatchability of eggs / M. M. Adame, Y. Yusuf, N. T. Kuda // *Advances in applied sciences*. 2023. V. 8. № 3. P. 80–85. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.aas.20230803.13> (дата обращения: 30.11.2024)
45. Adame M. M. Review on egg handling and management of incubation and hatchery environment / M. M. Adame, N. Ameha // *Asian journal of biological sciences*. 2023. V. 16. № 4. P. 474–484. DOI: <https://doi.org/10.3923/ajbs.2023.474.484> (дата обращения: 30.11.2024)
46. Adetola S.O. Design, construction and testing of a kerosene powered multi bird-egg incubator / S. O. Adetola, A. S. Adegbite, K. A. Adewale, O. S. Ibiwoye // *Lautech journal of civil and environmental studies*. 2019. V. 3. № 1. DOI: <https://doi.org/10.36108/laujoces%2F9102%2F20%280210%29> (дата обращения: 30.11.2024)
47. Aerts J.M. A computer vision system for the non-invasive measurement of the volume of broiler chickens / J.M. Aerts, S. Van Buggenhout, E. Vranken, M. Lippens, J. Buyse, E. Decuypere // *Biosystems Engineering*. – 2003. – Vol. 84, № 1. – P. 79–86.
48. Agbo D.O. Proposed development of a solarpowered automated incubator for chickens / D. O. Agbo, O. J. Otengye, S. H. Dodo // *International journal of engineering and techniques*. 2018. V. 4. № 1. P. 517–524. DOI: <https://doi.org/10.29126/23951303/IJET-V4I1P69> (дата обращения: 30.11.2024)
49. Al-Zaidi M. A. Optimum design calculation of eggs incubator / M. A. Al-Zaidi // *TECHNIUM*. 2022. V. 4. № 3. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.47577/technium.v4i3.6282> (дата обращения: 30.11.2025)
50. Aru O. E. Development of a computerized engineering technique to improve incubation system in poultry farms / O. E. Aru // *Journal of scientific and engineering research*. 2017. V. 4. № 6. P. 109–119.
51. Aziz D.A. A Developed IoT Platform-Based Data Repository for Smart Farming Applications / D.A. Aziz, R. Asgarnezhad, M. S. Mustafa, A. A. Saber // *Journal of Communications*. 2025. V. 18 (3): 187 https://www.researchgate.net/publication/392109745_A_Developed_IoT_Platform-

Based_Data_Repository_for_Smart_Farming_Applications (дата обращения: 30.08.2025)

52. Aziz D. A. The Recent Advances In IoT Based Smart Plant Irrigation Systems: A Brief Review/ D. A. Aziz, R. Asgarnezhad, S. N. Mahmood // in Proc. 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT). 2021. pp. 97-104. DOI:10.1109/ISMSIT52890.2021.9604699__ (дата обращения: 30.11.2024)

53. Bala A. M., Design and construction of a fully automated egg incubator using electric battery / A. M. Bala, M. A. Abubakar, M. S. Bello, I. Salako // African scholar journal of African sustainable development. 2020. V. 18. №. 2. Pp. 319-332/ URL: https://www.africanscholarpublications.com/wp-content/uploads/2021/01/AJASD_Vol18_No2_Sept_2020-26.pdf (дата обращения: 30.11.2024)

54. Bergman T.L. Introduction to Heat Transfer / T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. Dewitt. John Wiley and Sons.- New York. 2011. 6th ed.

55. Bhosale P. Development of smart egg incubator system using Arduino / P. Bhosale, J. Tripathi, H. Gillurkar, V. Barapatre, P. Ramteke, R. Burange, B. E. Student // International journal of engineering science and computing. 2018. V. 8. № 3. P. 16598–16600.

56. Boleli IC. Poultry Egg Incubation: Integrating and Optimizing Production Efficiency / IC Boleli, VS Morita, JB Matos Jr, M. Thimotheo, VR Almeida // Revista Brasileira de Ciência Avícola. 18. 1-16. DOI:10.1590/1806-9061-2016-0292

57. Brecht A. V. Quantification of the heat exchange of chicken eggs / A. Van Brecht, H. Hens, J.L. Lemaire, J.M. Aerts, P. Degraeve, D. Berckmans // Poultry Science. – 2005. – Vol. 84, № 3. – P. 353–361. DOI:10.1093/ps/84.3.353

58. Cengel Y.A. Heat and Mass Transfer: A Practical Approach / Y.A. Cengel. – 3rd ed. – New York : McGraw-Hill. 2006.

59. Çevik K.K. Deep Learning Based Egg Fertility Detection /K.K. Çevik, H.E. Koçer, M. Boğa //Veterinary Sciences. 2022. 9, no. 10: 574. <https://doi.org/10.3390/vetsci9100574> (дата обращения: 30.11.2024)

60. Chougule S. M. Smart egg incubator / S. M. Chougule, V. B. Desai, P. S. Gaikwad, S. S. Kamble, V. T. Metkari // International journal of advance scientific research and engineering trends. 2021. V. 6. № 6. P. 2456–0774.
61. Woodman C.J. Integrating machine learning and infrared smart cameras into critically endangered bird production / C.J. Woodman, A. Ridlon, C.J. Evelyn, A. Martinez, D. Valles // IEEE 14th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON). 2023. **DOI:** 10.1109/UEMCON59035.2023.10316121 (дата обращения: 30.11.2024)
62. Cutchin H.R. Embryonic development when eggs are turned different angles during incubation /H.R. Cutchin, M.J. Wineland, V. Christensen, S. Davis, K.M. Mann// The Journal of Applied Poultry Research. 2009. V. 18(3). Pp.447-451. DOI:10.3382/japr.2008-00079 (дата обращения: 30.11.2024)
63. Deeming D.C. Nests, eggs, and incubation: New ideas about avian reproduction / D.C. Deeming, S.J. Reynolds. – Oxford : Oxford University Press, 2015.
64. Domatskiy V. N. Differentiated incubation of chicken eggs / V. N. Domatskiy // Bulgarian journal of agricultural science. 2019. V. 25. № 2. P. 54–58.
65. Elibol O. Effect of egg turning angle and frequency during incubation on hatchability and incidence of unhatched broiler embryos with head in the small end of the egg / O Elibol, J. Brake // Poultry Science. 2006. V. 85(8). Pp.1433-1437. DOI:10.1093/ps/85.8.1433 (дата обращения: 30.12.2024)
66. Elijah O. An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges / O. Elijah, T. A. Rahman, I. Orikumhi, C. Y. Leow, M. N. Hindia// IEEE Internet of Things Journal. 2018. vol. 5. pp. 3758-3773. DOI:10.1109/IIOT.2018.2844296 (дата обращения: 30.11.2024)
67. Fadchar N. A., Cruz J. C. D. Prediction Model for Chicken Egg Fertility Using Artificial Neural Network / N. A. Fadchar, J.C.D. Cruz //2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA). 2020. – C. 916-920. DOI: 10.1109/ICIEA49774.2020.9101966 (дата обращения: 30.12.2024)
68. Faroqi A. Design of Arduino uno based duck egg hatching machine with sensor DHT22 and PIR sensor / A. Faroqi, M. R. Efendi, D. T. Ismail, W. Darmalaksana

// 2020 6TH International conference on wireless and telematics (ICWT). 2020. P. 1–4.
DOI: 10.1109/ICWT50448.2020.9243640 (дата обращения: 30.12.2024)

69. Fredrick O. M. Design and implementation of a remotely monitored smart egg incubator / O. M. Fredrick, U. T. Umar, A. N. Edmund, Z. Z. Ohunene // International journal of scientific and engineering research. 2021. V. 12. № 11. P. 1009–1017. URL: https://www.researchgate.net/publication/356911794_Design_and_Implementation_of_a_Remotely_Monitored_Smart_Egg_Incubator (дата обращения: 30.09.2024)

70. French N.A. Modeling incubation temperature: The effects of incubator design, embryonic development, and egg size / N.A. French // Poultry Science. – 1997. Vol. 76, № 1. Pp. 124–133. DOI:10.1093/ps/76.1.124 (дата обращения: 30.10.2024)

71. Ganiyat S. Design of a portable solar powered solar incubator / S. Ganiyat, I. R. Afolake // International journal of engineering and advanced technology. 2020. V. 9. № 4. P. 2366–2369. DOI: <https://doi.org/10.35940/ijeat.D7960.049420> (дата обращения: 30.10.2024)

72. Geng L. Fertility detection of hatching eggs based on a convolutional neural network / L. Geng, Y. Hu, Z. Xiao, J. Xi // Applied Sciences (Switzerland). 2019. vol. 9. nom.1408- (7) pp. – URL: https://www.researchgate.net/publication/332193854_Fertility_Detection_of_Hatching_Eggs_Based_on_a_Convolutional_Neural_Network (дата обращения: 30.09.2025)

73. Geng L. Hatching egg classification based on CNN with channel weighting and joint supervision /L. Geng, Huasong Liu, Zhitao Xiao, Tingyu Yan// Multimedia Tools and Applications. -June 2020. -79(1). – URL: https://www.researchgate.net/publication/328463939_Hatching_egg_classification_based_on_CNN_with_channel_weighting_and_joint_supervision (дата обращения: 30.10.2025)

74. Ghaderi M. Using dielectric properties and intelligent methods in separating of hatching eggs during incubation / M. Ghaderi, A. Banakar, A. A. Masoudi //Measurement. 2018. – T. 114. – С. 191-194.

75. Gupta N. Object identification using super sonic sensor: Arduino object radar/ N. Gupta, A. K. Agarwal// in Proc. International Conference on System Modeling

& Advancement in Research Trends (SMART). 2018. Pp. 92-96.

76. Hadoune O. Design and implementation of a fully automated system dedicated to the control of an egg incubator / O. Hadoune, M. Benouaret, M. F. Guellati // *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*. 2021. V. 28. Pp. 368-374. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1000315> (дата обращения: 30.10.2025)

77. Hashemzadeh M. A machine vision system for detecting fertile eggs in the incubation industry / M. Hashemzadeh, N. Farajzadeh // *International Journal of Computational Intelligence Systems*. 2016. V. 9. №. 5. Pp. 850–862. DOI:10.1080/18756891.2016.1237185 (дата обращения: 30.10.2025)

78. Hashim Y. Development of chicken egg incubator prototype with blynk notification / Y. Hashim, A. Ab Rahman, M. A. Azraai // *Research and innovation in technical and vocational education and training*. 2023. V. 3. № 1. P. 1–11. DOI:10.1504/IJCSE.2021.10039967 (дата обращения: 30.10.2025)

79. Holman J.P. *Heat Transfer* / J.P. Holman. – 9th ed. – New York : McGraw-Hill, 2002.

80. Hoyt D.F. The eggs of the Anatidae: Conductance, pore structure, and metabolism / D.F. Hoyt, H. Rahn, C.V. Paganelli // *The Condor*. – 1979. – Vol. 81, № 4. – P. 331–336.

81. Iyen C. Development of a low cost poultry egg incubation system / C. Iyen, E. Wunuken // *European journal of theoretical and applied sciences*. 2024. V. 2. № 3. P. 483–493. DOI: [https://doi.org/10.59324/ejtas.2024.2\(3\).37](https://doi.org/10.59324/ejtas.2024.2(3).37)

82. Joseph N.S. The effects of suboptimal eggshell temperature during incubation on broiler chick quality, live performance, and further processing yield / N.S. Joseph, A. Lourens, E.T. Moran // *Poultry Science*. – 2006. – Vol. 85, № 5. – P. 932–938.

83. Jung P. Experimental model for determining developmental stage of chicken embryo using infrared images and artificial neural networks / P. Jung, T. Hsieh, C-H Chen // *Proceedings Volume 8705, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXV; 87050H* (2013). <https://doi.org/10.1117/12.2015647>

84. Kaewtapee C. Artificial neural networks approach for predicting methionine requirement in broiler chickens / C. Kaewtapee, C. Khetchaturat, R. Nukreaw,

N.Krutthai, C. Bunchasak //The Thai Journal of Veterinary Medicine. 2021. Vol. 51. Iss. 1, Article 21. DOI: <https://doi.org/10.56808/2985-1130.3105> (дата обращения: 30.11.2025)

85. Kamienski C. Smart water management platform: IoT-based precision irrigation for agriculture / C. Kamienski, J. P. Soininen, M. Taumberger, R. Dantas, A. Toscano, T. S. Cinotti, et al. // Sensors. 2019. vol. 19. p. 276. DOI:10.3390/s19020276

86. Khatir Z. A computational fluid dynamics study of the thermal and moisture distribution in a poultry incubator / Z. Khatir, J. Paton, H. Thompson, N. Kapur // Biosystems Engineering. – 2014. – Vol. 118. – P. 25–36.

87. Kulakowski B.T. Dynamic Modelling and Control of Engineering Systems / B.T. Kulakowski, J.F. Gardner, J.L. Shearer. – 3rd ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 1996.

88. Kyeremeh F. Design and construction of an Arduino microcontroller based egg incubator / F. Kyeremeh, F. Peprah // International journal of computer applications. 2017. V. 168. № 1. P. 15–23.

89. Lawrence K. C. Imaging system with modified-pressure chamber for crack detection in shell eggs / K. C. Lawrence, S. C. Yoon, G. W. Heitschmidt, D. R. Jones, and B. Park // Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety, 2, pp. 116-122, (2008).

90. Li Q. MobileOne-YOLO: Improving the YOLOv7 network for the detection of unfertilized duck eggs and early duck embryo development-a novel approach / Q. Li, Z. Shao, W. Zhou, Q. Su, Q. Wang // Computers and Electronics in Agriculture. – 2023. – T. 214. – C. 108316. DOI:10.1016/j.compag.2023.108316 (дата обращения: 30.09.2025)

91. Li Y. A machine vision system for identification of micro-crack in egg shell / Y. Li, S. Dhakal, Y. Peng // Journal of Food Engineering. 2012. V. 109. Pp. 127–134.

92. Liu L. Detecting fertility and early embryo development of chicken eggs using near-infrared hyperspectral imaging / L. Liu, M. O. Ngadi // Food and Bioprocess Technology. 2013. V. 6. Pp. 2503-2513.

93. Lourens A. Effect of eggshell temperature during incubation on embryo

development, hatchability and post-hatch development / A. Lourens, H. van den Brand, R. Meijerhof, B. Kemp // *Poultry Science*. 2005. Vol. 84. Pp. 914–920.

94. Lourens A. The importance of air velocity in incubation / A. Lourens // *World Poultry*. 2001. Vol. 17, № 3. Pp. 29–30.

95. Mariani M.J.P. Design modification of a cost-efficient microcontroller-based egg incubator / M. J. P. Mariani, R. U. Wacas, R. J. Padre, G. T. Soriano, V. B. Elveña, J. C. Sarne // *Indian journal of science and technology*. 2021. V. 14. № 14. P. 1160–1167. DOI: <https://doi.org/10.17485/IJST/v14i14.2289> (дата обращения: 30.10.2025)

96. Maroma A. N. Development of automated egg incubator with backup power supply / A. N. Maroma, D. P. Maroma, B. A. Pangilinan // *Asean journal of community engagement*. 2023. V. 7. № 2. P.151–164.

97. Meijerhof R. Mathematical modelling of temperature and moisture loss of hatching eggs / R. Meijerhof, G. van Beek // *Journal of Theoretical Biology*. – 1993. Vol. 165. P. 27–41.

98. Mumuni F. Development of a State-Space Thermal Model for High Precision Temperature Control of a Poultry Incubator / F. Mumuni, A. Mumuni // *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*. 2015 Vol. 10, № 6, Ver. II. – Pp. 52–57.

99. Nakaguchi V. M. Development of an early embryo detection methodology for quail eggs using a thermal micro camera and the YOLO deep learning algorithm / Nakaguchi V. M., Ahamed T. // *Sensors*. – 2022. – T. 22. – №. 15. – C. 5820.

100. Nazir R. Perancangan Sistem Smart Egg Incubator Sebagai Optimalisasi Pemanfaatan Energi Terbarukan Di Ngalau Baribuik, Padang./ Nazir, R.; Pawawoi, A.; Latif, M.; Hamid, M. I.; Anugrah, P.; Fitrianto, E. // *Jurnal Warta Pengabdian Andalas*. 2023. V.30(2). Pp.304-313. <https://doi.org/10.25077/jwa.30.2.304-313.2023> (дата обращения: 30.05.2025)

101. Niranjan L. Design and implementation of chicken egg incubator for hatching using IoT / L. Niranjan, C. Venkatesan, A. R. Suhas, S. Satheeskumaran, S. A. Nawaz // *International journal of computational science and engineering*. 2021. V. 24.

№ 4. P. 363–372. DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJCSE.2021.10039967> (дата обращения: 30.08.2025)

102. Paguntalan B. R. Design and development of a microcontroller based egg incubator for small scale poultry production / B. R. Paguntalan, V. H. Oquino // Global journal of science frontier research. 2016. V. 16. №. 2. P. 43–48. DOI:10.13140/RG.2.2.35273.42082

103. Patel V. Color computer vision and artificial neural networks for the detection of defects in poultry eggs / V. Patel, R. McClendon, and J. Goodrum // Artificial Intelli-gence for Biology and Agriculture. 1998. V.12. Pp. 163-176. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-5048-4_8 (дата обращения: 30.08.2025)

104. Peprah F. Design and construction of smart solar powered egg incubator based on GSM/IoT / F. Peprah, S. Gyamfi, M. Amo-Boateng, E. Buadi, M. Obeng // Scientific African. 2022. V. 17. P. 13–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01326> (дата обращения: 30.08.2025)

105. Prabowo M. C. A. Development of an IoT-Based Egg Incubator with PID Control System and Web Application /M. C. A.Prabowo, I. Sayekti, S. Astuti, S. T. Nursaputro //JOIV International Journal on Informatics Visualization. 2024. V8(1). DOI:10.62527/joiv.8.1.2044 (дата обращения: 30.08.2024)

106. Radhakrishnan K. Design and implementation of a fully automated egg incubator / K. Radhakrishnan, N. Jose, S. G. Sanjay, T. Cherian, K. R. Vishnu // International journal of advanced research in electrical, electronics and instrumentation engineering. 2014. V. 3. № 2. P. 2056–5860.

107. Rahman M. Simulation of an energy saving egg incubator / M. Rahman, M. Islam, R. Barua, N. Mohammad // 5TH International conference in industrial and mechanical engineering and operations management (IMEOM). 2022. P. 86–95. DOI: <https://doi.org/10.46254/BD05.20220046>. (дата обращения: 30.07.2025)

108. Rancangan J.G.C. Egg fertility detection using image processing and fuzzy logic. /J.G.C. Rancangan, E.R. Arboleda, J. Dioses, R.M. Dellosa //Int. J. Sci. Technol. Res. 2019. V. 8. Pp. 3228–3230.

109. Ray P. P. Internet of things for smart agriculture: Technologies, practices and future direction / P. P. Ray// Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments. 2017. vol. 9. Pp. 395-420. URL: <http://dspace.cus.ac.in/jspui/bitstream/1/6301/1/NK006-20170724003.pdf> (дата обращения: 30.08.2025)
110. Sanjaya W. M. The development of quail eggs smart incubator for hatching system based on microcontroller and Internet of Things (IoT) / W. M. Sanjaya, S. Maryanti, C. Wardoyo, D. Anggraeni, M. A. Aziz, L. Marlina, A. Roziqin, A. Kusumorini // 2018 International conference on information and communications technology (ICOIACT). 2018. P. 407–411.
111. Schellpfeffer M.A. Microbubble contrast imaging of the cardiovascular system of the chick embryo / M.A. Schellpfeffer, G.L. Kolesari // Ultrasound Med. Biol. 2012, 3, 504–510.
112. Shittu S. Development of an automatic bird-egg incubator / S. Shittu, J. N. Olasunkanm, A. S. Muhammad, M. Jimoh, A. S. Muhammad // Journal of embedded system and applications. 2017. V. 5. № 1. P. 1–11.
113. Soeb M. J. A. Design and fabrication of low-cost incubator to evaluate hatching performance of egg / M. J. A. Soeb, M. R. Al Mamun, S. Shammi, M. Uddin, R. A. Eimon // European journal of engineering and technology research. 2021. V. 6. № 7. P. 91–96. DOI: <https://doi.org/10.24018/ejeng.2021.6.7.2662> (дата обращения: 30.10.2025)
114. Soyguder S. An expert system for the humidity and temperature control in HVAC systems using ANFIS and optimization with Fuzzy Modeling Approach / S. Soyguder, H. Alli // Energy and Buildings. – 2009. – Vol. 41, № 8. – P. 814–822.
115. Swastika R. The prototype design of duck egg incubator machine using Arduino uno r3 microcontroller / R. Swastika, E. Rohman, B. Aribowo // JTKSI (Jurnal teknologi komputer dan sistem informasi). 2023. V. 6. № 1. P. 102–106.
116. Tazawa, H. Incubation and the thermal environment of the embryo / H. Tazawa, G.C. Whittow // Sturkie's Avian Physiology / Ed. by G.C. Whittow. – 5th ed. – Academic Press, 2000.

117. Tiam Kapen P. Design and prototyping of a low-cost, energy efficient eggs incubator in developing countries: A case study of Cameroon / P. Tiam Kapen, M. Youssoufa, M. Foutse, H. Manfouo, F. O. Njotchui Mbakop // *Scientific African*. 2020. V. 10. P. 618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00618> (дата обращения: 30.08.2025)

118. Tona J.K. Day-old chick quality: Relationship to hatching egg quality, adequate incubation practice and prediction of broiler performance/, J.K. Tona, V.Bruggeman, O.M.Onagbesan, F. Bamelis, M. Gbeassor, K. Mertens, E. Decuypere // *Avian and Poultry Biology Reviews*. 2005 16. 109-119. URL: https://www.researchgate.net/publication/283826783_Day-old_chick_quality_Relationship_to_hatching_egg_quality_adequate_incubation_practice_and_prediction_of_broiler_performance (дата обращения: 20.08.2025)

119. Tullett S.G. The relationship between eggshell porosity and oxygen consumption of the embryo in the domestic fowl / S.G. Tullett, D.C. Deeming // *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*. – 1982. – Vol. 72, № 3. – P. 529–533.

120. Turner J.S. The thermal energetics of incubated bird eggs / J.S. Turner // *Egg Incubation: Its Effects on Embryonic Development in Birds and Reptiles* / Ed. by D.C. Deeming, M.W.J. Ferguson. – Cambridge : Cambridge University Press, 1991. – P. 117–146.

121. Unik M. Internet of thing and automatics control system on quail egg incubator using human-centered design method / M. Unik, Y. Fatma, M. Tantaya // *AIP conference proceedings*. 2022. V. 2499. № 1. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0105718> (дата обращения: 10.08.2025)

122. Wilson H.R. Physiological requirements of the developing embryo: Temperature and turning / H.R. Wilson // *Avian Incubation* / Ed. by S.G. Tullett. – London : Butterworth-Heinemann, 1991. – P. 145–156.

123. Wahyuni R. Smart Egg Incubator Based on IoT and AI Technology for Modern Poultry Farming/R. Wahyuni, Y. Irawan, A. Febriani, N. Nurhadi//*ILKOM Jurnal Ilmiah*. 2024. V. 16(2). Pp.134-144. DOI:10.33096/ilkom.v16i2.1957.134-144

124. Xu Q.L. Non-destructive detection on the fertility of injected SPF eggs in vaccine manufacture /Q.L. Xu, F.Y. Cui // In Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Changsha, China, 31 May–2 June 2014. Pp. 1574–1579.
125. Xu Y. Automatic Sorting System of Egg Embryo in Biological Vaccines Production Based on Multi-information Fusion /Y. Xu, A. Xu, T. Xie //. Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery. 2015. V. 46(2). Pp.20-26. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.004
126. Yu H. Chicken embryo fertility detection based on PPG and convolutional neural network //Infrared Physics & Technology. 2019. V. 103. Pp. 103075.
127. Zhu Z.H. Nondestructive detection of infertile hatching eggs based on spectral and imaging information / Z.H. Zhu, T. Liu, D.J. Xie, Q.H. Wang, M.H. Ma // International Journal of Agricultural and Biological Engineering.2015. V. 8(4). Pp. 69-76. DOI:10.3965/j.ijabe.20150804.1672.
128. Naeem M. Advancements in machine learning applications in poultry farming: a literature review / M. Naeem, Z. Jia, J. Wang, S. Poudel, S. Manjankattil, Y. Adhikari, M. Bailey, D. Bourassa// Journal of Applied Poultry Research. 2025. V. 34. 100602 - <https://doi.org/10.1016/j.japr.2025.100602>.

Листинг программного кода методики расчёта теплообмена в инкубаторе

```

import matplotlib.pyplot as f
import numpy as e
import csv

Bi_table = []
lambdal_table = []
Al_table = []

with open("AA.txt", 'r') as file:
    csv_reader = csv.reader(file, delimiter=' ', skipinitialspace=True)
    for row in csv_reader:
        if len(row) == 3: # Проверяем, что в строке 3 значения
            try:
                Bi_table.append(float(row[0]))
                lambdal_table.append(float(row[1]))
                Al_table.append(float(row[2]))
            except ValueError:
                print(f"Пропущена строка с некорректными данными: {row}")

Bi_table = e.array(Bi_table)
lambdal_table = e.array(lambdal_table)
Al_table = e.array(Al_table)

sort_indices = e.argsort(Bi_table)
Bi_table = Bi_table[sort_indices]
lambdal_table = lambdal_table[sort_indices]
Al_table = Al_table[sort_indices]

# Функция для поиска ближайшего табличного значения
def find_nearest_value(x, xp, yp):
    # Находим индекс ближайшего значения в xp к x
    idx = e.argmin(e.abs(xp - x))
    return yp[idx]

```

Рисунок 1 - Реализация процедуры инициализации и предварительной обработки
данных

```

# Параметры
t8 = 37.5 # °C
k = 0.6 # W/m·°C
diam = []
for d in range(37, 42):
    diam.append(d/1000)
# Цвета для диаметров
colors = ['#1f77b4', '#ff7f0e', '#2ca02c', '#d62728', '#9467bd']
diam_labels = [f'D = {d:.3f} м' for d in diam]
# Создание графиков
f1, x1 = f.subplots(figsize=(10, 6))
f2, x2 = f.subplots(figsize=(10, 6))
print("\nРасчет коэффициента теплопередачи и числа Био:")
print("D (м)\tv (м/с)\t\th (Вт/м²·°C)\tBi\t\t\lambda\t\t\tAl")
print("-" * 80)
# Расчёт и график для коэффициента теплопередачи и числа Био
for D in diam:
    hs = []
    vs = []
    bis = []
    lambda_v = []
    Al_v = []
    for v in range(0, 2000):
        h = 0.336 * 4.184 * (1.46 + (v/10)**0.5) |
        Bi = h * D / k

        lambda = find_nearest_value(Bi, Bi_table, lambda_table)
        Al = find_nearest_value(Bi, Bi_table, Al_table)

        hs.append(h)
        vs.append(v / 1000)
        bis.append(Bi)
        lambda_v.append(lambda)
        Al_v.append(Al)
    # Вывод для некоторых скоростей
    if v % 400 == 0 and v <= 1600: # Выводим каждые 400 итераций до 1600
        print(f"{D}\t{v/1000:.2f}\t\t{h:.4f}\t\t{Bi:.4f}\t\t{\lambda:.4f}\t\t{Al:.4f}")
    x1.plot(vs, hs, label=f'D = {D} м')
    x2.plot(vs, bis, label=f'D = {D} м')

```

Рисунок 2 - Параметрическое исследование влияния скорости воздушного потока и диаметра яйца на коэффициент теплоотдачи, число Био и связанные параметры


```

T_air = 37.5 # температура воздуха
T_i = 28.0 # начальная температура яйца
a = 0.15e-6 # температуропроводность воды (м²/с)
t = e.linspace(0, 6 * 3600, 100) # время от 0 до 6 часов

# ГРАФИК 3: Безразмерная температура от времени для всех диаметров и скоростей
f3, axes3 = f.subplots(2, 2, figsize=(15, 12))
axes3 = axes3.flatten()

for idx, v in enumerate([0.5, 1.0, 1.5, 2.0]):
    x = axes3[idx]

    for i, D in enumerate(diam):
        h = 0.336 * 4.184 * (1.46 + (100*v)**0.5)
        Bi = h * D / k
        lambdal = find_nearest_value(Bi, Bi_table, lambdal_table)
        Al = find_nearest_value(Bi, Bi_table, Al_table)

        theta_vals = []
        for t_val in t:
            F0 = a * t_val / D**2
            Theta = Al**2 * e.exp(-lambdal**2 * F0)
            theta_vals.append(Theta)

        x.plot(t, theta_vals, color=colors[i], label=diam_labels[i], linewidth=2)

    x.grid(True, alpha=0.3)
    x.set_xlabel("Время, с", fontsize=11)
    x.set_ylabel("Безразмерная температура  $\theta$ ", fontsize=11)
    x.set_title(f'Скорость v = {v} м/с', fontsize=12)
    x.legend(fontsize=10)

f3.suptitle('Изменение безразмерной температуры со временем для разных скоростей и диаметров',
            fontsize=16, y=0.95)

```

Рисунок 3 - Реализация построения графиков скорости изменения температуры от времени для различных диаметров и скоростей

```

# ГРАФИК 4: Температура в центре от времени для всех диаметров и скоростей
f4, axes4 = f.subplots(2, 2, figsize=(15, 12))
axes4 = axes4.flatten()

for idx, v in enumerate([0.5, 1.0, 1.5, 2.0]):
    x = axes4[idx]

    for i, D in enumerate(diam):
        h = 0.336 * 4.184 * (1.46 + (100*v)**0.5)
        Bi = h * D / k
        lambdal = find_nearest_value(Bi, Bi_table, lambdal_table)
        Al = find_nearest_value(Bi, Bi_table, Al_table)

        tc_vals = []
        for t_val in t:
            F0 = a * t_val / D**2
            Theta = Al * e.exp(-lambdal**2 * F0)
            Tc = T_air + Theta * (T_i - T_air)
            tc_vals.append(Tc)

        x.plot(t, tc_vals, color=colors[i], label=diam_labels[i], linewidth=2)

    x.axhline(y=T_air, color='k', linestyle='--', alpha=0.7, label='Температура воздуха')
    x.grid(True, alpha=0.3)
    x.set_xlabel("Время, с", fontsize=11)
    x.set_ylabel("Температура в центре, °C", fontsize=11)
    x.set_title(f'Скорость v = {v} м/с', fontsize=12)
    x.legend(fontsize=10)
    x.set_ylim(27, 39)

f4.suptitle('Температура в центре яйца для разных скоростей и диаметров',
            fontsize=16, y=0.95)

```

Рисунок 4 - Реализация анализа температурного режима в центре яйца в зависимости от времени, варьируя скорость воздушного потока и диаметр яйца

Рисунок 5 - Реализация графиков и вывод таблицы параметров для всех комбинаций диаметров и скоростей

Приложение 2

УТВЕРЖДАЮ

Директор муниципального унитарного сельскохозяйственного
предприятия «Кемеровская инкубаторно-птицеводческая станция»

Иванов Петр Васильевич

**АКТ**

внедрения результатов использования алгоритма комплексной
технологии инкубации куриных яиц с применением системы компьютерного
зрения и тепловизионного анализа

21 апреля 2026 г.

г. Кемерово

Приемочная комиссия в составе:

Председателя: зоотехник МУ СХП Кемеровская инкубаторно-
птицеводческая станция, Белобородова К.Ю.

Членов комиссии:

оператор инкубатория, Петренко А.Н.

электромеханик инкубатория, Васильченко В.П.

зав. кафедрой мехатроники и автоматизации технологических систем,
д.т.н., профессор, Неверов Е.Н.

аспирант Ширманова Г.С.

1. На МУ СХП Кемеровская инкубаторно-птицеводческая станция
внедрён алгоритм комплексной технологии инкубации куриных яиц,
включающий систему компьютерного зрения (СКЗ) для анализа внешнего

вида яиц перед закладкой и тепловизионный анализ микроклимата и температуры яиц в процессе инкубации.

2 Целью внедрения является снижение времени проведения операций сортировки и миражирования яйца, а также улучшение условий труда работников цеха инкубации.

Внедрение комплексной технологии позволяет уменьшить время миражирования на более чем на 40%, что позволит увеличить производительность труда работников при мираже инкубационного яйца, а также снизить степень охлаждения инкубационного яйца, что положительно повлияет на развитие эмбриона. Кроме того, фиксируется снижение общего энергопотребления на 15%, и обеспечивается улучшение условий труда работников инкубатория.

Председатель комиссии:



Белобородова К.Ю.

Члены комиссии:

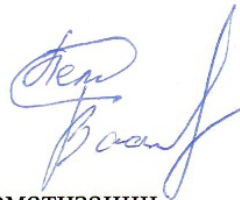
оператор инкубатория

электромеханик инкубатория

зав. кафедрой мехатроники и автоматизации

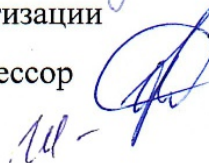
технологических систем, д.т.н., профессор

аспирант



Петренко А.Н.

Васильченко В.П.



Неверов Е.Н.

Ширманова Г.С.

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«Племенная птицефабрика «Снежинская»

652625, Россия, Кемеровская область, Беловский район, п. Снежинский
телефон/факс 8 (38452) 97-100 ИНН 4202020141 КПП 420201001 ОГРН
1024200547986 Р/сч. 40702810326140100857 в Сибирский банк Сбербанка РФ
г.Новосибирска ОСБ 2359 г. Белово БИК 045004641 Кор/сч.
30101810500000000641

Генеральный директор ООО «ППФ Снежинская»

П. П. П. П.

Праскурин А.А.

АКТ

внедрения результатов использования системы компьютерного зрения
для анализа внешнего вида яиц сельскохозяйственной птицы перед
инкубацией

23 апреля 2026 г.

г. Белово

Приемочная комиссия в составе:

Председателя: Генеральный директор ООО «ППФ Снежинская»
Праскурин А.А.

Членов комиссии:

Директор по производству Иголкина Н.В.

механик Пырников А.А.

зав. кафедрой мехатроники и автоматизации технологических систем,
д.т.н., профессор, Неверов Е.Н.

аспирант Ширманова Г.С.

Провела приемочные испытания лабораторного образца системы
компьютерного зрения для анализа внешнего вида яиц сельскохозяйственной
птицы перед инкубацией и считает, что предъявленный образец
соответствует техническому заданию на проектирование и отвечает
техническим требованиям, указанным в проекте.

Приложение: протокол приемочных испытаний от 23 апреля 2026 г.

Протокол

приёмочных испытаний системы компьютерного зрения для анализа внешнего вида яиц перед инкубацией

23 апреля 2026 г.

г. Белово

Приемочная комиссия в составе:

Председателя: Генеральный директор ООО «ППФ Снежинская»
Праскурин А.А

Членов комиссии:

директор по производству Иголкина Н.В.

механик Пырсигов А.А.

зав. кафедрой мехатроники и автоматизации технологических систем,
д.т.н., профессор Неверов Е.Н.

аспирант Ширманова Г.С.

1. Цель испытаний

Проверить, соответствует ли система компьютерного зрения (СКЗ) требованиям технического задания и готова ли она к запуску в промышленную эксплуатацию.

2. Объект испытаний

СКЗ для автоматизированного анализа яиц перед инкубацией, включающая: аппаратную часть (микрокомпьютер, камеру, дисплей, смотровую камеру), программное обеспечение (алгоритм обработки изображений, модуль машинного обучения).

3. В ходе испытаний проверяли точность измерения диаметров яиц, способность выявлять трещины, пятна, деформации, скорость обработки (время на одно яйцо), устойчивость к внешним помехам (пыль, вибрация), формирование отчётов в CSV/Excel.

В результате приемочных испытаний комиссия установила следующее:

1. В ходе испытаний система компьютерного зрения продемонстрировала показатели точности и эффективности при анализе внешнего вида яиц перед инкубацией ошибка составила $\pm 2\%$. По точности измерений система учитывает требования: погрешность при определении большого и малого диаметров яиц, что позволяет надёжно сортировать яйца по размерам и выявлять деформации формы.
2. Скорость работы системы также соответствует требованиям. В результате, анализ партии из 100 яиц выполняется за 5 минут. Это существенно ускоряет процесс сортировки и повышает пропускную способность цеха.

Таким образом, по всем ключевым показателям система компьютерного зрения не только соответствует требованиям технического задания, но и демонстрирует запас надёжности, что подтверждает её готовность к промышленной эксплуатации.

Председатель комиссии:



Праскурин А.А.

Члены комиссии:

Директор по производству



Иголкина Н.В.

Механик



Пырников А.А.

Зав. кафедрой мехатроники и автоматизации технологических систем,

д.т.н., профессор



Неверов Е.Н.

Аспирант



Ширманова Г.С.



АКТ
внедрения в учебный процесс материалов диссертационного
исследования Ширмановой Г.С.

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой мехатроники и автоматизации технологических систем, доктор технических наук, профессор Неверов Е.Н., заведующий кафедрой цифровых технологий, доктор технических наук, доцент Степанов Ю.А., начальник методического отдела УМУ, кандидат технических наук, доцент Румянцева Е.Е. составили настоящий акт о том, что материалы диссертационного исследования Ширмановой Г.С. внедрены в учебный процесс при реализации образовательных программ бакалавриата по направлениям 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств, 02.03.02 Фундаментальная информатика и информационные технологии, 09.03.03 Прикладная информатика и магистратуры 9.04.03 Прикладная информатика.

Разработанный алгоритм автоматизированной оценки качества яиц сельскохозяйственной птицы на основе системы компьютерного зрения; предложенный оригинальный метод и разработанная программа для расчёта локальных температурных полей; предложенный новый алгоритм адаптивного управления работой инкубатора и ПИД-регулирования микроклимата в инкубационной камере будут использованы при проведении лабораторных и практических занятий, а также при выполнении и подготовке выпускных квалификационных работ.

Зав. кафедрой мехатроники и автоматизации
технологических систем, д.т.н., профессор

Неверов Е.Н.

Зав. кафедрой цифровых технологий,
д.т.н., доцент

Степанов Ю.А.

Начальник методического отдела
учебно-методического управления,
к.т.н., доцент

Румянцева Е.Е.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 238376

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИНКУБАЦИИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПТИЦ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кемеровский государственный университет" (RU)*

Авторы: *Ширманова Гузаль Самигуллаевна (RU), Неверов Евгений Николаевич (RU), Владимиров Александр Александрович (RU), Плотников Игорь Борисович (RU), Николаева Елена Владимировна (RU), Руднев Павел Сергеевич (RU)*

Заявка № 2025114044

Приоритет полезной модели 26 мая 2025 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 28 октября 2025 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 26 мая 2035 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7add8d531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.09.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **238 376**⁽¹³⁾ **U1**
(51) МПК
A01K 41/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
A01K 41/00 (2025.08)

(21)(22) Заявка: 2025114044, 26.05.2025
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
26.05.2025
Дата регистрации:
28.10.2025
Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 26.05.2025
(45) Опубликовано: 28.10.2025 Бюл. № 31
Адрес для переписки:
650000, г. Кемерово, ул. Красная, 6, ФГБОУ
ВО "КГУ", Научно-инновационное управление,
Боровикова Анастасия Павловна

(72) Автор(ы):
Ширманова Гузьяль Самигуллаевна (RU),
Неверов Евгений Николаевич (RU),
Владимиров Александр Александрович (RU),
Плотников Игорь Борисович (RU),
Николаева Елена Владимировна (RU),
Руднев Павел Сергеевич (RU)
(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Кемеровский государственный
университет" (RU)
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: CN 1094888 A, 16.11.1994 EP 4445727
A1, 16.10.2024. RU 212952 U1, 15.08.2022. RU
185271 U1, 29.11.2018.

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИНКУБАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПТИЦ

(57) Реферат:
Настоящая полезная модель относится к оборудованию для инкубации сельскохозяйственных птиц с возможностью варьирования параметров инкубации, сокращения окна вывода птенцов, применения технологии Интернета вещей (IoT). Устройство для инкубации сельскохозяйственных птиц содержит микроконтроллер, керамические нагревательные элементы со встроенными вентиляторами для распространения нагретого воздуха, символьный дисплей, тактовые кнопки, резервуар с водой для увлажнения воздуха в корпусе, вентилятор над резервуаром для регуляции влажности, реле для питания нагревателей и вентилятора. Корпус устройства изготовлен из теплоизоляционного материала. Для регулярного поворота яиц применяются валики, приводимые в движение серводвигателем, передающим крутящий момент

валикам посредством зубчатого передаточного механизма. Мониторинг температуры и влажности в корпусе устройства производится посредством многофункционального датчика температуры и влажности. Измерение температуры нагревателей осуществляется при помощи цифрового датчика температуры. Выявление момента вывода птенцов производится посредством цифровой видеокамеры и микрофона. Цифровая видеокамера служит также для визуального мониторинга процесса инкубации. Сокращение окна вывода птенцов осуществляется за счет воспроизведения естественных звуков курицы в момент вывода птенцов посредством динамика. Отправка данных инкубации на ЭВМ производится с помощью модуля Wi-Fi. 2 табл., 3 ил.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2024682622**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2024682622 Дата регистрации: 25.09.2024 Номер и дата поступления заявки: 2024681903 25.09.2024 Дата публикации и номер бюллетеня: 25.09.2024 Бюл. № 10 Контактные реквизиты: Тел.: +7 (3842) 58-32-52. E-mail: patent@kemsu.ru	Автор(ы): Неверов Евгений Николаевич (RU), Руднев Павел Сергеевич (RU), Ширманова Гузьяль Самигуллаевна (RU), Владимиров Александр Александрович (RU) Правообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет» (RU)
---	--

Название программы для ЭВМ:

Программа управления работой устройства инкубации яиц сельскохозяйственной птицы**Реферат:**

Программа предназначена для контроля и управления процессом нагревания воздуха в устройстве для инкубации яиц сельскохозяйственной птицы на базе микроконтроллера ATmega328.

Функционал программы: чтение и запись значений температуры нагревателя, влажности, давления и температуры окружающего воздуха, времени в секундах с момента включения устройства и их вывода на монохромный жидкокристаллический символьный экран 16x2. При превышении температуры (38.3 °C) происходит выключение нагревательного элемента, включение происходит при падении температуры ниже заданного предела (38.3 °C). Возможно включение спящего режима. Измеряемые параметры не только выводятся на символьный экран, но и пересылаются по последовательному интерфейсу на ПК, где записываются в CSV-файл дополнительной программой на языке Python 3.9.0.

Язык программирования: C++, Python

Объем программы для ЭВМ: 4 Кб