

УДК 636.5:004.8

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ИНКУБАЦИИ ЯИЦ ПТИЦЫ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Ширманова Г.С., старший преподаватель кафедры экономических наук и информационных технологий, Молотков П.П., ассистент кафедры экономических наук и информационных технологий, Молоткова А.В., преподаватель кафедры экономических наук и информационных технологий
Беловский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Кемеровский
государственный университет»
г. Белово

Современное птицеводство характеризуется интенсивной цифровизацией производственных процессов, что обусловлено необходимостью повышения эффективности, снижения себестоимости продукции и минимизации влияния человеческого фактора на экономические результаты [1]. Инкубация яиц представляет собой критически важный технологический этап, от качества которого напрямую зависят выводимость, жизнеспособность молодняка и последующая продуктивность поголовья. Традиционные методы контроля параметров инкубации, основанные на усреднённых значениях температуры, влажности и воздухообмена, не позволяют в полной мере учитывать индивидуальные особенности развития эмбрионов в каждой партии яиц.

Развитие технологий Интернета вещей (IoT), больших данных (Big Data) и искусственного интеллекта, создают предпосылки для перехода к прецизионному управлению биологическими процессами. А появление новых высокопродуктивных кроссов птицы, требует индивидуализированных режимов инкубации и использования современных инкубаторов.

Обзор литературы свидетельствует, что ключевые зарубежные производители инкубационного оборудования ориентированы на внедрение интеллектуальных систем управления, базирующихся на концепции биологической обратной связи со стороны развивающегося организма. Так, бельгийская компания Petersime реализовала технологию Embryo-Response Incubation™, обеспечивающую непрерывный контроль фактической температуры эмбриона, уровня углекислого газа и динамики потери массы яиц. Указанные параметры используются для адаптивной настройки режимов инкубации применительно к каждой отдельной партии [2]. Функциональная архитектура данного решения включает несколько ключевых модулей:

- OvoScan™ - отслеживание температуры поверхности скорлупы с целью поддержания теплового баланса;
- CO₂NTROL™ - непрерывный мониторинг концентрации диоксида углерода и автоматическая коррекция воздухообмена;

- Dynamic Weight Loss System™ - регулирование влажности на основе данных о снижении массы яиц;
- Synchro-Hatch™ - синхронизация вылупления, позволяющая сузить временной интервал появления молодняка.

Сопоставимые по функционалу разработки предлагают нидерландские компании HatchTech (технология MicroClimer) и Pas Reform (система SmartPro™, включающая модуль адаптивной метаболической обратной связи AMF™). Российский производитель SEGANEL также представил интеллектуальную систему, в которой метаболическое тепло эмбриона используется в качестве расчётного параметра при управлении температурными режимами [3, 9].

Среди представленных на рынке решений выделяется подход компании SEGANEL, в рамках которого метаболическое тепло рассматривается не в качестве побочного явления, а как регулируемый элемент системы терморегуляции. Предложенная технология «Контроль температуры яйца» основана на отводе тепла от области «тепловой короны» (зоны, прилегающей к скорлупе) посредством испарения мелкодисперсной водной взвеси. Как показывают данные [3], реализация данного принципа позволяет уменьшить температурную неоднородность внутри камеры и достичь сокращения энергопотребления до 30% на отдельных этапах эмбриогенеза.

В группе активно развивающихся подходов следует отметить использование компьютерного зрения совместно с методами глубокого обучения при решении задач неинвазивного определения фертильности яиц и отслеживания эмбрионального развития. В исследовании [7] авторами предложена конфигурация системы машинного зрения, включающая ПЗС-камеру и светодиодный источник излучения мощностью 0,12 Вт. Эффективность разработанного решения характеризуется следующими показателями точности классификации: 47,13% — на первые сутки инкубации, 81,41% — на вторые, 93,08% — на третьи, 98,25% — на пятые. Приведённые показатели значительно превосходят эффективность традиционной овоскопии.

В работе [8] была предложена методика раннего детектирования эмбрионов в перепелиных яйцах с применением тепловизионной микрокамеры FLIR VUE 336 и алгоритмов семейства YOLO. Сравнительная оценка моделей YOLOv4, YOLOv5 и SSD-MobileNet V2 показала, что YOLOv5 демонстрирует наилучшие результ. Изотермическая фильтрация радиометрических данных позволила идентифицировать специфические тепловые паттерны оплодотворённых яиц, в том числе наличие «камерной» структуры в центральной части тёмного поля.

В обзоре [5, 6] авторами подтверждается устойчивая тенденция к интеграции компьютерного зрения и искусственных нейронных сетей в технологические процессы инкубации. Отмечается, что свёрточные нейронные архитектуры (ResNet, EfficientNet и методы трансферного обучения) позволяют достигать точности классификации состояния яиц на уровне 96–99% при временных затратах менее 0,3 секунды на один объект анализа.

К числу основных преимуществ автоматизированных систем на основе методов машинного обучения следует отнести:

- высокую степень объективности и воспроизводимости результатов, что исключает влияние субъективного фактора оператора;
- возможность обработки значительных массивов данных в режиме реального времени;
- раннюю идентификацию неоплодотворённых яиц и эмбрионов с нарушениями развития, что способствует рациональному использованию инкубационных мощностей;
- накопление структурированных данных, пригодных для последующего обучения моделей и прогнозирования выводимости.

Применение аддитивных технологий в промышленном производстве, включая агропромышленный комплекс, характеризуется рядом специфических особенностей, которые определяют их потенциал для модернизации технологических процессов инкубации яиц сельскохозяйственной птицы. Как отмечают Кузьмина и Кузьмин в своих исследованиях, современные цифровые решения в отечественной инкубации основываются на использовании высокоточных датчиков, микроконтроллерной техники и программных алгоритмов, способных адаптировать параметры инкубации под конкретные биологические потребности эмбриона [1, 2]. Хотя прямое применение 3D-печати в инкубационном оборудовании в представленных источниках освещено фрагментарно, анализ работ зарубежных исследователей позволяет экстраполировать ключевые преимущества аддитивного производства на данную отрасль. В частности, технология Embryo-Response Incubation™ компании Petersime, описанная авторами [1], демонстрирует принцип персонализированного управления параметрами инкубации на основе обратной связи с эмбрионом, что методологически коррелирует с возможностями аддитивных технологий по созданию кастомизированных компонентов оборудования с оптимизированной геометрией теплообмена и аэродинамики. При этом следует констатировать, что непосредственное исследование применения аддитивных технологий именно в инкубации яиц сельскохозяйственной птицы в отечественной и зарубежной литературе представлено недостаточно полно, что указывает на актуальность дальнейших междисциплинарных исследований. Анализ современных тенденций позволяет выделить несколько перспективных направлений их интеграции.

1. Персонализированные элементы инкубационного оборудования на основе аддитивных технологий. Применение методов аддитивного производства открывает возможности для изготовления лотков, фиксирующих приспособлений и элементов внутренней компоновки инкубационных камер с заранее заданными аэродинамическими и теплообменными характеристиками. В рамках аддитивных технологий выделяется возможность изготовления лотков с градиентной пористостью, что обеспечивает дифференцированный режим воздухообмена с учётом стадии эмбрионального развития либо видовой

принадлежности яиц. Как свидетельствуют имеющиеся данные, подобная индивидуализация конфигурации воздушных потоков позволяет уменьшить градиент температур внутри камеры на 0,2–0,3 °C [4].

2. Биосовместимые сенсорные системы и интеллектуальные вкладыши. Использование биосовместимых полимеров (PLA, PCL и др.) в сочетании с 3D-печатью для создания одноразовых сенсорных вставок, интегрируемых непосредственно в лотковую систему инкубатора. Такие изделия могут оснащаться микроканалами для отбора проб воздуха, миниатюрными датчиками влажности и температуры, а также флуоресцентными маркерами, позволяющими визуализировать метаболическую активность эмбриона. Практическая реализация подобных решений даёт возможность применить принцип «одно яйцо — один датчик» при снижении рисков контаминации.

3. Адаптивные системы микроклимата с применением 4D-печати. В группе перспективных разработок рассматриваются материалы с эффектом памяти формы (технология 4D-печати), способные менять геометрию в ответ на изменение температуры или влажности. Так, вентиляционные заслонки либо элементы регулирования влажности, выполненные из термочувствительных гидрогелей, могут самостоятельно корректировать параметры микроклимата в отдельных зонах инкубатора, реагируя на колебания метаболического тепла, выделяемого эмбрионами.

4. Ускоренное прототипирование экспериментальных установок. Применение аддитивных технологий заметно сокращает продолжительность разработки и испытаний оборудования, используемого для изучения эмбриогенеза. Исследовательские группы за счёт этого получают возможность в короткие сроки изготавливать специализированные камеры для тепловизионной съёмки, держатели для микровидеокамер, а также адаптеры под различные типы сенсоров — всё это ускоряет выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

5. Ресурсоэффективность и экологическая составляющая. Модель производства по требованию, реализуемая посредством 3D-печати, позволяет минимизировать объёмы отходов и логистические издержки, так как запасные компоненты могут изготавливаться непосредственно на месте эксплуатации оборудования. Применение биоразлагаемых материалов для производства одноразовых элементов инкубационной оснастки согласуется с принципами устойчивого развития и циркулярной экономики.

На основании проведённого анализа могут быть выделены следующие приоритетные направления для последующих исследований:

1. Создание гибридных прогностических моделей, объединяющих данные компьютерного зрения, тепловизионного контроля, акустической эмиссии и биохимических маркеров для интегральной оценки жизнеспособности эмбрионов.

2. Разработка цифровых двойников инкубационных процессов на основе технологий Big Data и методов машинного обучения, обеспечивающих моделирование траекторий развития эмбрионов при различных режимах

микроклимата и позволяющих своевременно корректировать параметры инкубации.

3. Интеграция аддитивных технологий с функциональными материалами для выпуска «интеллектуальных» лотков, оснащённых встроенными датчиками, микрофлюидными каналами и адаптивными элементами теплообмена.

4. Разработка унифицированных стандартов и протоколов межсистемного взаимодействия на основе открытых архитектур (OPC UA, MQTT). Это позволит обеспечить совместимость цифровых платформ различных производителей и снизить барьеры при масштабировании решений.

5. Применение методов объяснимого искусственного интеллекта (ХАИ) для повышения уровня доверия операторов к рекомендациям автоматизированных систем и обеспечения прозрачности логики принятия решений в нештатных ситуациях.

Совокупность проанализированных публикаций позволяет заключить: интеграция компьютерного зрения, тепловизионного контроля и алгоритмов глубокого обучения обеспечивает существенный прирост достоверности при ранней диагностике фертильности и мониторинге эмбрионального развития. Фиксируемые показатели точности в таких системах превышают 95–99%.

Наиболее привлекательными с точки зрения дальнейшего развития представляются аддитивные методы, открывающие возможности для создания персонализированных, адаптивных и ресурсоэффективных компонентов инкубационного оборудования. Хотя данное направление только начинает систематически изучаться, в обозримом будущем можно прогнозировать появление биосовместимых сенсорных систем, многофункциональных лотков с изменяемой геометрией и элементов микроклимат-контроля, реализованных на принципах 4D-печати.

Для поступательного развития данной предметной области необходим междисциплинарный подход, объединяющий компетенции в птицеводстве, информационных технологиях, материаловедении и робототехнике. К числу первоочередных задач относятся формирование стандартизированных протоколов обмена данными, создание объяснимых моделей искусственного интеллекта и обеспечение кибербезопасности цифровых платформ. Практическая реализация обозначенных направлений создаст предпосылки для перехода к качественно иному уровню прецизионного управления инкубационными процессами, что в условиях растущего глобального спроса позволит устойчиво повышать продуктивность и качество продукции птицеводства.

Список литературы:

1. Кузьмина Т.Н., Зотов А.А. Инновационные технологии инкубации яиц птицы с автоматическим контролем основных критических параметров: науч. аналит. обзор. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. – 92 с. Режим доступа: <https://rosinformagrotech.ru/data/elektronnye-kopii->

[izdanij/zhivotnovodstvo/send/6-zhivotnovodstvo/1352-innovatsionnye-tehnologii-inkubatsii-yaits-ptitsy-s-avtomaticheskim-kontrolem-osnovnykh-kriticheskikh-parametrov-2019](#) (дата обращения: 21.03.2026).

2. Кузьмина Т.Н. Цифровизация в отечественной инкубации яиц птицы / Кузьмина Т.Н., Кузьмин В.Н. // Техничко-технологическое обеспечение инноваций в агропромышленном комплексе: сб. науч. тр. – Мелитополь, 2022. С. 283-288.- Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=facokw> (дата обращения: 20.03.2026)

3. Постригань С.А. Инновационные технологии в инкубации / Постригань С.А., Маковой Л.П. // Птицеводство.- 2018.- №2. - С. 41-46. – Режим доступа: https://seganel.com/innovatsionnye_tehnologii_v_inkubatsii (дата обращения: 20.03.2026).

4. Технологии Petersime [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.petersime.com> дата обращения: 20.03.2026).

5. 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.

6. 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

7. Hashemzadeh M., Farajzadeh N. A machine vision system for detecting fertile eggs in the incubation industry //International Journal of Computational Intelligence Systems. – 2016. – Т. 9. – №. 5. – С. 850–862.

8. 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. – Т. 22. – №. 15. – С. 5820.

9. SEGANEL. Инновационные технологии в инкубации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://seganel.com> (дата обращения: 20.03.2026).