

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 636.082.474

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-261-7-67-76

Е.Н. Неверов, Г.С. Ширманова, А.А. Владимиров,
А.Л. Майтаков, А.Ю. Соколова
E.N. Neverov, G.S. Shirmanova, A.A. Vladimirov,
A.L. Maytakov, A.Yu. Sokolova

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАГРЕВА КУРИНОГО ЯЙЦА ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

MATHEMATICAL MODELING OF UNSTEADY HEATING OF A CHICKEN EGG UNDER FORCED CONVECTION

Ключевые слова: коэффициент конвективной теплоотдачи, число Био, скорость воздушного потока, математическое моделирование, нестационарная теплопроводность, инкубация яиц.

Температурный режим является ключевым фактором, определяющим успешность инкубации яиц сельскохозяйственной птицы. Отклонения от оптимальных параметров приводят к снижению выводимости и ухудшению жизнеспособности птенцов. Несмотря на наличие фундаментальных работ по теплообмену, недостаточно исследовано комплексное влияние гидродинамических и геометрических факторов на нестационарный теплообмен в условиях промышленной инкубации. Цель исследования – количественная оценка влияния скорости воздушного потока и геометрических размеров яйца на динамику его нагрева в инкубаторе. Исследование выполнено методом математического моделирования нестационарного теплообмена. Яйцо аппроксимировано сферическим телом, заполненным водой, с учётом 6 принятых допущений. Решение уравнения теплопроводности Фурье получено с граничными условиями 3-го рода. Параметрический анализ выполнен для диапазона диаметров яйца 37-41 мм и скоростей воздушного потока 0-2 м/с. Расчёт коэффициентов теплоотдачи и числа Био выполнен на основе эмпирических зависимостей. Установлено, что коэффициент конвективной теплоотдачи возрастает с 2,05 до 12,45 Вт/(м²·°C) при увеличении скорости потока от 0 до 2 м/с. Число Био находится в диапазоне 0,13-0,86, что соответствует переходному режиму теплообмена. Время достижения яйцом температуры 35°C варьируется от 45 до 70 мин. в зави-

симости от диаметра; разница между крайними значениями составляет 35%. Наиболее существенное сокращение времени прогрева (35-40%) достигается при увеличении скорости от 0 до 1,0 м/с. Рекомендуемая скорость воздушного потока для смешанной партии яиц диаметром 37-41 мм составляет 1,0 м/с, что обеспечивает баланс между интенсивностью теплообмена и энергетическими затратами. Полученные количественные зависимости могут быть использованы для инженерного проектирования энергоэффективных инкубационных систем.

Keywords: convective heat transfer coefficient, Biot number, air flow velocity, mathematical modeling, unsteady heat conduction, egg incubation.

The temperature regime is a key factor determining the success of poultry egg incubation. Deviations from optimal parameters lead to decreased hatchability and deterioration of chick viability. Despite the existence of fundamental works on heat transfer, the complex influence of hydrodynamic and geometric factors on unsteady heat transfer under commercial incubation conditions is understudied. The research goal is to quantify the influence of air flow velocity and egg geometric dimensions on the dynamics of egg heating in an incubator. The study was performed by mathematical modeling of unsteady heat transfer. The egg is approximated by a spherical body filled with water taking into account six accepted assumptions. The solution of the Fourier heat conduction equation is obtained with boundary conditions of the third kind. Parametric analysis is performed for egg diameters ranging from 37 to 41 mm and air flow velocities from 0 to 2 m/s. The calculation of heat trans-

fer coefficients and the Biot number is based on empirical relationships. It was found that the convective heat transfer coefficient increased from 2.05 to 12.45 W ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) at increasing flow velocity from 0 to 2 m/s. The Biot number was in the range of 0.13–0.86 which corresponded to the transient heat transfer regime. The time to reach an egg temperature of 35°C varied from 45 to 70 minutes depending on the diameter; the difference between the extreme values was 35%. The most signifi-

cant reduction in heating time (35–40%) was achieved by increasing the velocity from 0 to 1.0 m/s. The recommended air flow velocity for a mixed batch of eggs with a diameter of 37–41 mm is 1.0 m/s which provides a balance between heat transfer intensity and energy consumption. The obtained quantitative relationships may be used for the engineering design of energy-efficient incubation systems.

Неверов Евгений Николаевич, д.т.н., профессор, и.о. директора института инженерных технологий, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: neverov42@mail.ru.

Ширманова Гузья Самигуллаевна, ст. преподаватель, Беловский институт (филиал), Кемеровский государственный университет, г. Белово, Кемеровская обл., Российская Федерация, e-mail: minigulova_gs@mail.ru.

Владимиров Александр Александрович, проектный менеджер, Дом научной коллаборации имени П.А. Чихачева, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: fizickemsu@mail.ru.

Майтаков Анатолий Леонидович, д.т.н., профессор, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: may585417@mail.ru.

Соколова Анастасия Юрьевна, ассистент, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: socolova.nastya25@mail.ru.

Neverov Evgeniy Nikolaevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Acting Director, Institute of Engineering Technologies, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: neverov42@mail.ru.

Shirmanova Guzyal Samigullaevna, Asst. Prof., Belovo Institute (Branch), Kemerovo State University, Belovo, Kemerovo Region, Russian Federation, e-mail: minigulova_gs@mail.ru.

Vladimirov Aleksandr Aleksandrovich, Project Manager, P.A. Chikhachev House of Scientific Collaboration, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: fizickemsu@mail.ru.

Maytakov Anatoliy Leonidovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: may585417@mail.ru.

Sokolova Anastasiya Yurevna, Asst., Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: socolova.nastya25@mail.ru.

Введение

Температурный режим является критически важным фактором успешной инкубации яиц птицы, непосредственно влияющим на эмбриональное развитие, выводимость. Поддержание оптимальной температуры $37,5\text{--}38^\circ\text{C}$ 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.

Анализ литературных источников показал, что проблема точного контроля теплового режима инкубации требует междисциплинарного подхода, объединяющего теплофизику, физиологию. Фундаментальные основы процессов теплопереноса изложены в работах [1–3]. Динамические аспекты управления инженерными системами рассмотрены в работе [4]. Непосредственно задачам моделирования теплообмена в яйцах посвящены исследования [5–8], а современные тенденции связаны с применением методов вычислительной гидродинамики [9] и интеллектуальных систем управления [10–13].

Цель исследования – 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 ($0\text{--}2$ м/с) и диаметра яйца (37–41 мм) на теплофизические характеристики; определить временные параметры прогрева.

Объекты и методы

Объектом исследования является куриное инкубационное яйцо в первые сутки инкубации. Геометрические параметры соответствуют яй-

цам мясных и 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 $37,5^{\circ}\text{C}$ – оптимальном значении для эмбрионального развития большинства пород сельскохозяйственной птицы [5, 14].

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

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% [5].

2. Внутреннее содержимое яйца (белок и желток) заменяется водой как основным компонентом. Массовая доля воды в свежем курином яйце составляет 85–88% [8]. Теплофизические свойства остальных компонентов (белков, липидов, минеральных веществ) близки к свойствам воды. 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 $k_{shell} \approx 0,7–0,8$ Вт/(м·C) [6]. Термическое сопротивление скорлупы $R_{shell} = \frac{\delta}{k_{shell}} \approx 0,0005 \text{ м}^2 \times \frac{\text{C}}{\text{Вт}}$. Полное термическое сопротивление теплообмену определяется суммой внешнего конвективного сопротивления ($\frac{1}{h} \approx 0,08–0,48 \text{ м}^2 \times \frac{\text{C}}{\text{Вт}}$) и внутреннего сопротивления теплопроводности $R_{int} \sim \frac{D}{k} \approx 0,06–0,07 \text{ м}^2 \times \frac{\text{C}}{\text{Вт}}$. Вклад скорлупы составляет менее 1%, что позволяет его не учитывать. Данное допущение даёт верхнюю оценку скорости прогрева яйца.

4. Внутренние источники тепла (метаболизм эмбриона) на начальном этапе инкубации (первые 24–48 ч) отсутствуют. Тепловыделение эмбриона становится значимым начиная с 5–7-х сут. инкубации [8], что выходит за временные рамки данного исследования (6 ч). Таким образом, модель описывает исключительно

нагрев яйца от начальной температуры до температуры инкубатора.

5. Температурное поле в объеме яйца принимается симметричным относительно его центра (сферическая симметрия). Такое упрощение обосновано равномерным обдувом яйца воздухом со всех сторон, как это предусмотрено в конструкции типовых промышленных инкубаторов с принудительной вентиляцией.

6. Теплофизические свойства яйца считаются постоянными, независящими от температуры. В диапазоне температур $28–38^{\circ}\text{C}$ изменение теплоёмкости и теплопроводности воды не превышает 2–3%, что позволяет принять их постоянными без значимой потери точности [1].

На основе этих упрощений приняты следующие численные значения теплофизических параметров [1, 2]:

- коэффициент теплопроводности: $k = 0,6$ Вт/(м·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:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), 0 \leq r \leq R, t > 0, \quad (1)$$

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):

$$T(r, 0) = T_i = 28^{\circ}\text{C}, 0 \leq r \leq R. \quad (2)$$

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

$$-\left. \frac{k \partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = h(T(R, t) - T_{\infty}), t > 0, \quad (3)$$

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 , $^{\circ}\text{C}$.

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 (1) имеет аналитическое решение в виде бесконечного ряда [1, 2]. Безразмерная температура в центре сферы $T_c(t)$ выражается как:

$$\theta = \frac{T_c(t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 F_o}, \quad (4)$$

где θ – безразмерная величина, обозначающая изменение температуры;

$T_c(t)$ – температура в центре яйца,

$F_o = \frac{\alpha t}{D^2}$ – число Фурье.

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

$$Bi = \frac{hD}{k}, \quad (5)$$

где h – коэффициент конвективного теплообмена на поверхности яйца;

k – коэффициент теплопроводности.

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:

$$1 - \lambda \cot \lambda = Bi. \quad (6)$$

Коэффициент конвективного теплообмена h ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$) на поверхности яйца рассчитывается по эмпирической зависимости для поперечного обтекания сферы вынужденным потоком воздуха [2, 3]:

$$h = 0.336 \times 4.184 \times (1.46 + \sqrt{100v}), \quad (7)$$

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 [2].

Расчёты выполнены в среде Python с использованием библиотек NumPy и Matplotlib. Параметрический анализ проведён для диаметров 37, 38, 39, 40, 41 мм 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 ч с дискретизацией 100 точек.

Результаты и их обсуждение

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 рассчитана по формуле (7) (рис. 1).

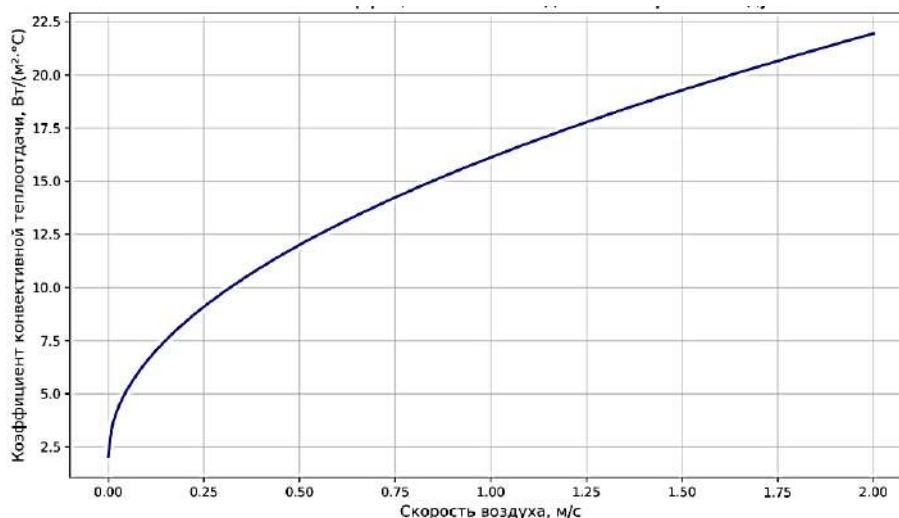


Рис. 1. Зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи от скорости воздуха

Установлено, что с увеличением скорости воздуха от 0 до 2 м/с коэффициент h возрастает с 2,05 до 12,45 Вт/(м²·°C). 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·°C). При скоростях выше 1 м/с темп роста снижается до 1,0-1,5 Вт/(м²·°C) на каждые 0,5 м/с.

Перейдём к анализу числа Био. График зависимости критерия Био от скорости воздуха для пяти исследуемых диаметров яйца (рис. 2).

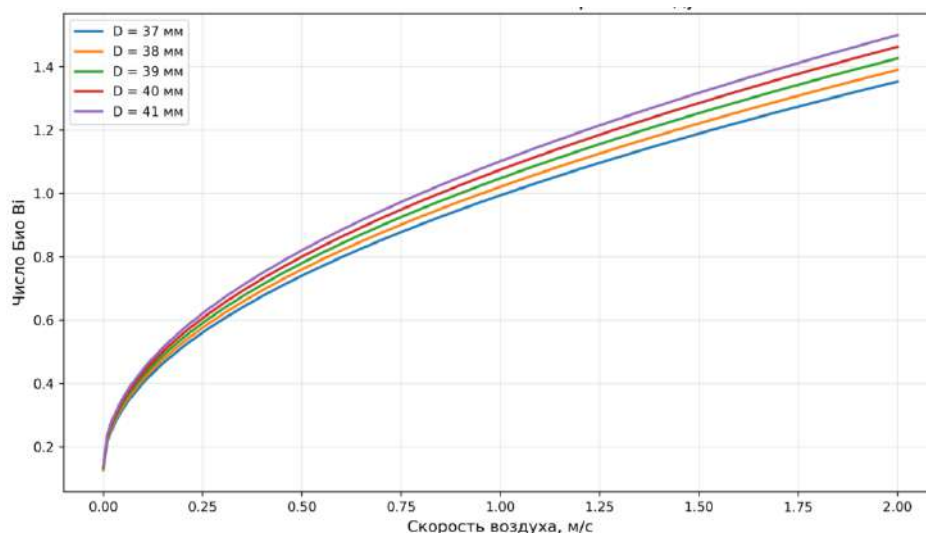


Рис. 2. Зависимость числа Био от скорости воздуха

Число Био, определяемое соотношением (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) с использованием первого члена ряда является корректным [1, 2].

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 $Bi \sim D$ (5). Для яиц большего диаметра внутреннее термическое сопротивление вносит больший вклад в общее сопротивление теплопередачи, что отражается на замедлении прогрева центральной части.

Анализ влияния скорости обдува показал, что при увеличении скорости от 0,5 до 2,0 м/с Bi возрастает в 1,7-1,8 раза для всех диаметров, что связано с ростом коэффициента теплопередачи $h \sim \sqrt{v}$.

Для оценки динамики нагрева необходимо оценить динамику нагрева яйца в безразмерных координатах. Кривые безразмерной температуры θ во времени для различных сочетаний скорости воздуха и диаметра яйца (рис. 3).

Безразмерная температура $\theta = (T_c - T_\infty)/(T_i - T_\infty)$ показывает, какая доля начального температурного перепада ($T_i - T_\infty = -9,5^\circ\text{C}$) сохраняется в центре яйца к моменту времени t . При $\theta = 0,1$ температура в центре достигает 37°C (отклонение от T_∞ менее $0,5^\circ\text{C}$).

Анализ графиков показывает, что кривые $\theta(t)$ имеют экспоненциальный характер, что соответствует аналитическому решению уравнения теплопроводности. Основным параметром, определяющим скорость релаксации, – $\lambda_1^2 \times Fo$; при этом λ_1 возрастает по мере увеличения Bi .

Увеличение скорости обдува с 0,5 до 2,0 м/с сокращает время достижения $\theta = 0,1$ примерно на 40%. При $v > 1,0$ м/с эффект ослабевает: дополнительный рост скорости дает лишь малый выигрыш по времени.

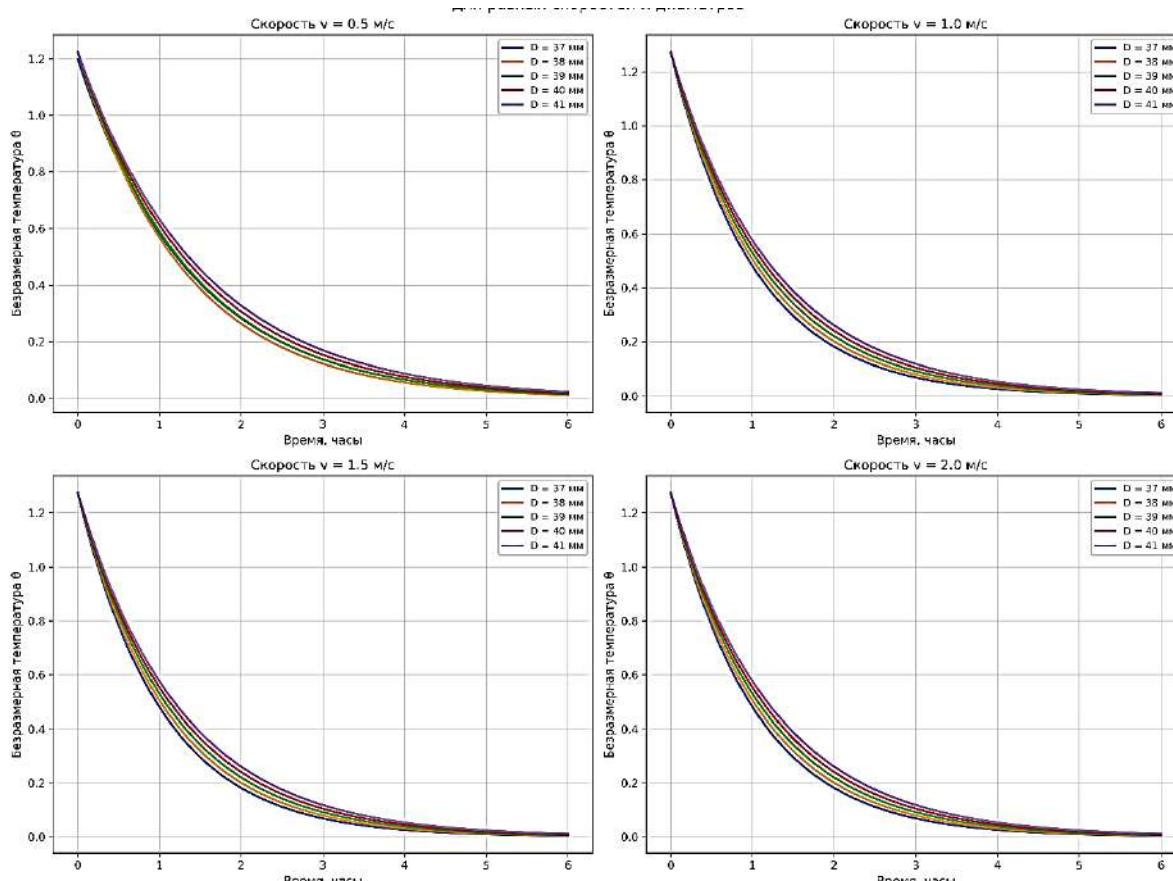


Рис. 3. Изменение безразмерной температуры со временем для разных скоростей и диаметров

Диаметр яйца существенно влияет на процесс, так при $v = 2,0$ м/с для диаметра яйца $D = 37$ мм температура $\theta = 0,1$ достигается за 45 мин., а для диаметра $D = 41$ мм – за 70 мин. (разница около 35%). Это следует из зависимости числа Фурье $F_0 = \frac{at}{D^2}$, где чем больше D , тем медленнее происходит нагрев.

Для практических целей предпочтительнее использовать абсолютные значения температуры. На рисунке 4 представлены температурные профили в центре яйца, отражающие нагрев центральной зоны от $28,0^\circ\text{C}$ (начальная температура) до $37,5^\circ\text{C}$ (температура в инкубаторе).

Анализ представленных графиков позволяет количественно оценить время нагрева яйца до температуры 35°C (условная граница начала активного эмбрионального развития) и 37°C (соответствует установившемуся тепловому режиму). Для яйца диаметром 37 мм при скорости потока воздуха 2,0 м/с температура 35°C достигается за 45 мин., а для яйца диаметром 41 мм при той же скорости – за 70 мин. Полученные зависимости свидетельствуют о влиянии геометрического фактора, а именно, увеличение диаметра на 4 мм приводит к замедлению прогрева на 35-55% в зависимости от скорости потока.

Обобщим полученные результаты на едином графике. Сводный график температурных кривых для всех комбинаций параметров представлен на рисунке 5.

Интегральный анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

1. Наиболее существенное сокращение времени прогрева наблюдается при увеличении скорости от 0 до 1,0 м/с (сокращение на 35-40% времени достижения 37°C). Дальнейшее повышение скорости до 2,0 м/с даёт дополнительное сокращение лишь на 10-15%.

2. Размерный фактор является критическим: для яиц диаметром 41 мм время прогрева на 35-55% больше, чем для яиц 37 мм, в зависимости от скорости потока.

3. Рекомендуемый режим: для смешанной партии яиц диаметром 37-41 мм скорость воздушного потока 1,0 м/с обеспечивает баланс между интенсивностью теплообмена и энергетическими затратами.

Для удобства использования полученных результатов в инженерной практике сформирована структурированная таблица теплофизических характеристик, содержащая для всех 20 комбинаций параметров (5 диаметров $\times$ 4 скорости) (рис. 6).

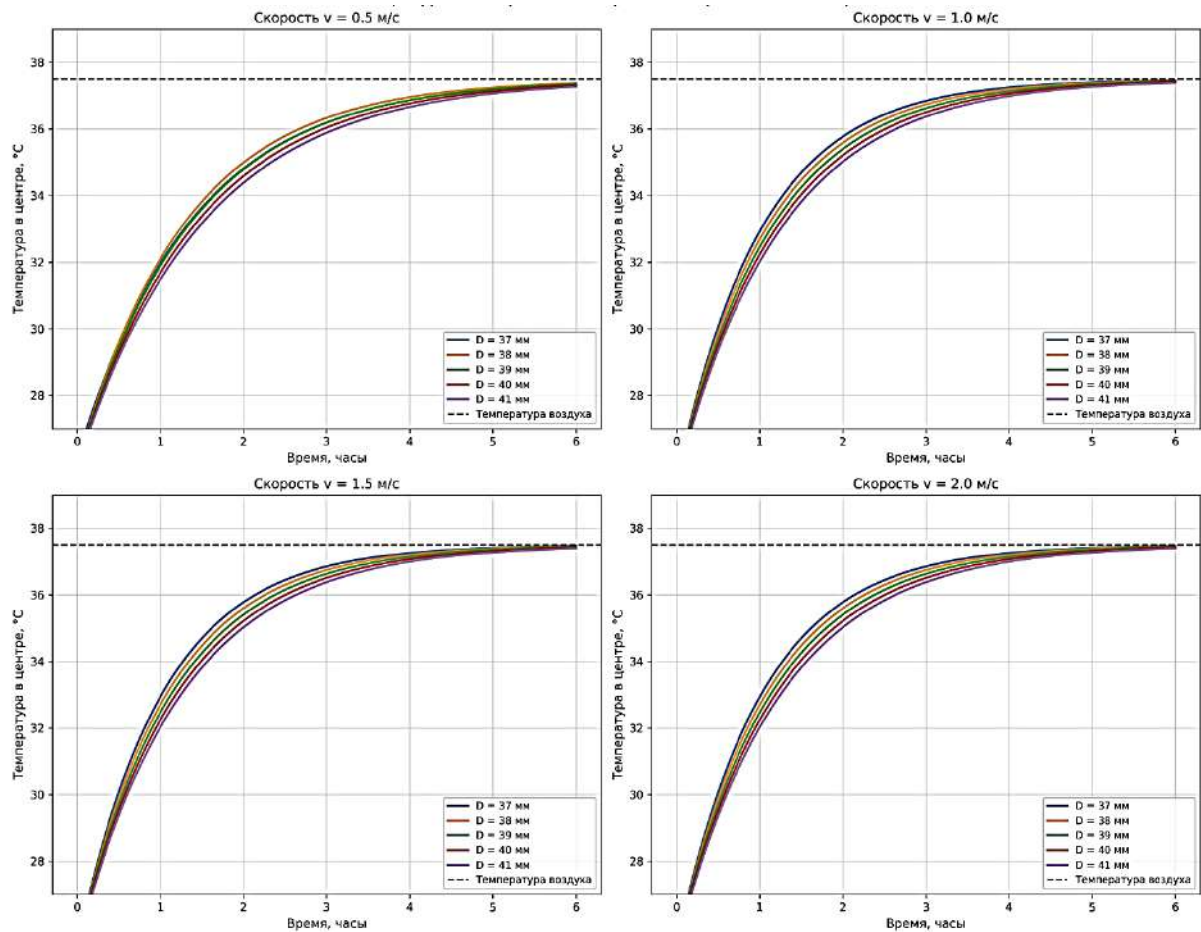


Рис. 4. Значение температуры в центре яйца для разных скоростей и диаметров

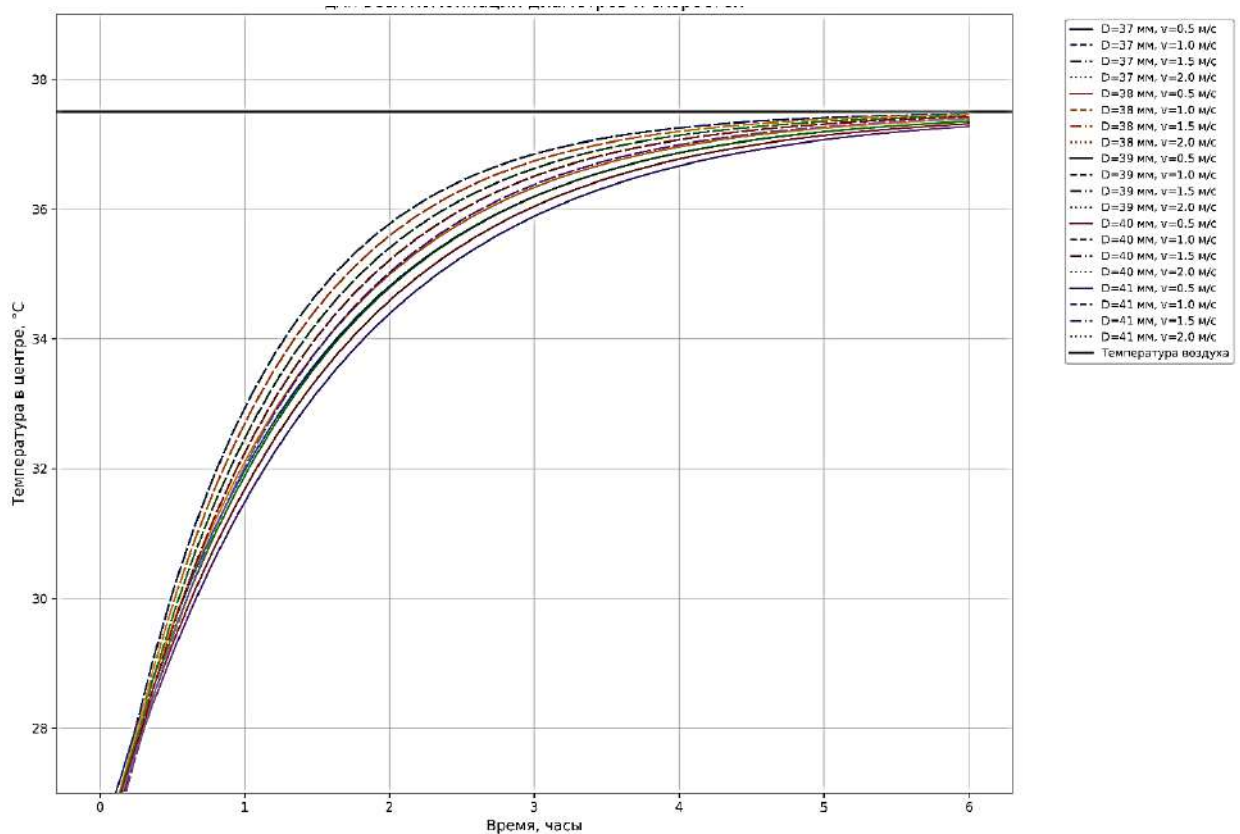


Рис. 5. Сводный график: температура в центре яйца для всех комбинаций диаметров и скоростей

ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ ВСЕХ КОМБИНАЦИЙ СКОРОСТЕЙ И ДИАМЕТРОВ

D (м)	v (м/с)	h (Вт/м ² · °C)	Bi	lambda1	A1
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

Рис. 6. 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·°C) 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 мин., тогда как для яйца диаметром 41 мм этот процесс за-

нимает 70 мин. 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 $h \sim \sqrt{v}$.

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.

Библиографический список

1. Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., & Dewitt, D.P. Introduction to Heat Transfer / T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. Dewitt. 6th ed. New York: John Wiley and Sons, 2011.
2. Cengel, Y.A. Heat and Mass Transfer: A Practical Approach. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

3. Holman, J.P. Heat Transfer. 9th ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
4. Kulakowski B.T., Gardner J.F., Shearer J.L. (2007). Dynamic Modeling and Control of Engineering Systems. 3rd ed. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9780511805417.
5. French, N.A. (1997). Modeling incubation temperature: The effects of incubator design, embryonic development, and egg size. *Poultry Science*. 76 (1): 124-133. DOI: 10.1093/ps/76.1.124.
6. Судаков, А. Н. Универсальный температурный режим инкубации яиц мясных кроссов кур для приусадебного и фермерского птицеводства / А. Н. Судаков, Е. А. Андрианов, Н. Я. Скользнев. – Текст: электронный // Птицеводство. – 2020. – № 7-8. – С. 51-57. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43973533> (дата обращения: 28.10.2025).
7. Mumuni, F., Mumuni, A. (2015). Development of a State-Space Thermal Model for High Precision Temperature Control of a Poultry Incubator. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*. 10 (6), Ver. II: 52–57. DOI: 10.9790/1676-10625257.
8. Van Brecht, A., Hens, H., Lemaire, J. L., et al. (2005). Quantification of the heat exchange of chicken eggs. *Poultry Science*, 84(3), 353–361. <https://doi.org/10.1093/ps/84.3.353>.
9. Khatir, Z., Paton J., Thompson H., Kapur N. (2014). A computational fluid dynamics study of the thermal and moisture distribution in a poultry incubator. *Biosystems Engineering*. 118: 25–36.
10. Hashemzadeh, M., Farajzadeh, N. (2016). A Machine Vision System for Detecting Fertile Eggs in the Incubation Industry. *International Journal of Computational Intelligence Systems*. 9. 850-862. DOI: 10.1080/18756891.2016.1237185.
11. Woodman C. J., Ridlon A., Evelyn C. J., et al. (2023). Integrating machine learning and infrared smart cameras into critically endangered bird production. *2023 IEEE 14th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*, New York, NY, USA, pp. 0523-0527, DOI: 10.1109/UEMCON59035.2023.10316121.
12. Обзор методов машинного обучения и компьютерного зрения в технологии инкубации яиц сельскохозяйственных птиц / Г. С. Ширманова, Е. Н. Неверов, Е. В. Николаева, А. А. Владимиров. – Текст: непосредственный // Вестник АПК Верхневолжья. – 2024. – № 4 (68). – С. 92-99.
13. Разработка системы компьютерного зрения для неразрушающей оценки качества и классификации куриных яиц / Г. С. Ширманова, Е. Н. Неверов, А. А. Владимиров [и др.]. – Текст: непосредственный // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2025. – № 3 (59). – С. 158-168
14. Кузьмина Т. Н. Цифровые решения для инкубации яиц птицы, предлагаемые зарубежными компаниями в России / Т. Н. Кузьмина, В. Н. Кузьмин, В. Ф. Мовчан. – Текст: электронный // Техно-технологическое обеспечение инноваций в агропромышленном комплексе: материалы I Международной научно-практической конференции, Мелитополь, 22-23 ноября 2022 года / ФГБОУ ВО «Мелитопольский государственный университет». – Мелитополь, 2022. – С. 168-173. – URL: https://elar.mgu-mlt.ru/pdf/742_publication.pdf (дата обращения: 20.09.2025).
15. Chougule S. M., Desai V. B., Gaikwad P. S., et al. (2021). Smart egg incubator. *International Journal of Advance Scientific Research and Engineering Trends*. 6 (6): 2456–0774. DOI: 10.51319/2456-0774.2021.6.0018.
16. Seok, H. W., Kim, R. W., Kim, C. M., Kim, J. G. (2025). Optimization of operating conditions for egg setters using computational fluid dynamics simulations. *Poultry Science*, 104 (12), 105897. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.105897>.
17. Применение методов математического моделирования тепловых процессов при разработке энергосберегающего оборудования для инкубации яиц сельскохозяйственной птицы / Г. С. Ширманова, Е. Н. Неверов, Е. В. Николаева [и др.]. – DOI 10.53083/1996-4277-2025-253-11-63-71. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2025. – № 11 (253). – С. 63-71.
18. Применение микроконтроллера Atmega в управлении работой инкубатора для выведения сельскохозяйственной птицы / Е. Н. Неверов, Г. С. Ширманова, А. А. Владимиров, П. С. Руднев. – Текст: непосредственный // АПК России. – 2025. – Т. 32, № 1. – С. 71-81.

References

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

2. Cengel, Y.A. Heat and Mass Transfer: A Practical Approach. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
3. Holman, J.P. Heat Transfer. 9th ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
4. Kulakowski B.T., Gardner J.F., Shearer J.L. (2007). Dynamic Modeling and Control of Engineering Systems. 3rd ed. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9780511805417.
5. French, N.A. (1997). Modeling incubation temperature: The effects of incubator design, embryonic development, and egg size. *Poultry Science*. 76 (1): 124-133. DOI: 10.1093/ps/76.1.124.
6. Sudakov A.N. Universalnyy temperaturnyy rezhim inkubatsii yaits myasnykh krossov kur dlya priusadebnogo i fermerskogo ptitsevodstva / Sudakov A.N., Andrianov E.A., Skolzneva N.Ya. // Ptitsevodstvo. 2020. No. 7-8. S. 51-57. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43973533> (data obrashcheniya: 28.10.2025).
7. Mumuni, F., Mumuni, A. (2015). Development of a State-Space Thermal Model for High Precision Temperature Control of a Poultry Incubator. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*. 10 (6), Ver. II: 52–57. DOI: 10.9790/1676-10625257.
8. Van Brecht, A., Hens, H., Lemaire, J. L., et al. (2005). Quantification of the heat exchange of chicken eggs. *Poultry Science*, 84(3), 353–361. <https://doi.org/10.1093/ps/84.3.353>.
9. Khatir, Z., Paton J., Thompson H., Kapur N. (2014). A computational fluid dynamics study of the thermal and moisture distribution in a poultry incubator. *Biosystems Engineering*. 118: 25–36.
10. Hashemzadeh, M., Farajzadeh, N. (2016). A Machine Vision System for Detecting Fertile Eggs in the Incubation Industry. *International Journal of Computational Intelligence Systems*. 9. 850-862. DOI: 10.1080/18756891.2016.1237185.
11. Woodman C. J., Ridlon A., Evelyn C. J., et al. (2023). Integrating machine learning and infrared smart cameras into critically endangered bird production. *2023 IEEE 14th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*, New York, NY, USA, pp. 0523-0527, DOI: 10.1109/UEMCON59035.2023.10316121.
12. Shirmanova G.S., Neverov E.N., Nikolaeva E.V., Vladimirov A.A. Obzor metodov mashinnogo obucheniya i kompyuternogo zreniya v tekhnologii inkubatsii yaits selskokhozyaystvennykh ptits // Vestnik APK Verkhnevolzhya. 2024. No. 4 (68). S. 92-99.
13. Shirmanova G.S., Neverov E.N., Vladimirov A.A., Osintsev A.M., Rudnev P.S. Razrabotka sistemy kompyuternogo zreniya dlya nerazrushayushchey otsenki kachestva i klassifikatsii kurinykh yaits // Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2025. No. 3 (59). S. 158-168
14. Kuzmina, T. N. Tsifrovye resheniya dlya inkubatsii yaits ptitsy, predlagaemye zarubezhnyimi kompaniyami v Rossii / T. N. Kuzmina, V. N. Kuzmin, V. F. Movchan // Tekhniko-tekhnologicheskoe obespechenie innovatsiy v agropromyshlennom komplekse: Materialy I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Melitopol, 22–23 noyabrya 2022 goda. – Melitopol: MelGU, 2022. – S. 168-173.
15. Chougule S. M., Desai V. B., Gaikwad P. S., et al. (2021). Smart egg incubator. *International Journal of Advance Scientific Research and Engineering Trends*. 6 (6): 2456–0774. DOI: 10.51319/2456-0774.2021.6.0018.
16. Seok, H. W., Kim, R. W., Kim, C. M., Kim, J. G. (2025). Optimization of operating conditions for egg setters using computational fluid dynamics simulations. *Poultry Science*, 104 (12), 105897. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.105897>.
17. Shirmanova G.S. Primenenie metodov matematicheskogo modelirovaniya teplovykh protsessov pri razrabotke energosberegayushchego oborudovaniya dlya inkubatsii yaits selskokhozyaystvennoy ptitsy / G. S. Shirmanova, E. N. Neverov, E. V. Nikolaeva [i dr.] // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2025. – No. 11 (253). – S. 63-71. – DOI 10.53083/1996-4277-2025-253-11-63-71.
18. Neverov E.N., Shirmanova G.S., Vladimirov A.A., Rudnev P.S. Primenenie mikrokontrollera Atmega v upravlenii rabotoy inkubatora dlya vyvedeniya selskokhozyaystvennoy ptitsy // APK Rossii. 2025. T. 32. No. 1. S. 71-81.

