

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 631.171

Г.С. Ширманова, Е.Н. Неверов, Е.В. Николаева,
А.А. Владимиров, А.М. Осинцев

DOI: 10.53083/1996-4277-2025-253-11-63-71

G.S. Shirmanova, E.N. Neverov, E.V. Nikolaeva,
A.A. Vladimirov, A.M. Osintsev

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИНКУБАЦИИ ЯИЦ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПТИЦЫ

APPLICATION OF METHODS OF THERMAL PROCESS MATHEMATICAL MODELING IN THE DEVELOPMENT OF ENERGY-SAVING EQUIPMENT FOR INCUBATION IN POULTRY BREEDING

Ключевые слова: яйца сельскохозяйственной птицы, инкубатор, моделирование тепловых процессов, температура инкубации, скорость нагрева, влажность.

Рассматривается задача повышения энергоэффективности инкубационных систем на основе применения математического моделирования тепловых процессов. Во вводной части обозначена актуальность исследований, связанная с необходимостью оптимизации конструкции бытовых и промышленных инкубаторов. Отмечается переход от электромеханических систем к цифровому управлению на базе микроконтроллеров и современных технологий, включая IoT и элементы искусственного интеллекта. Методика основана на использовании комплексной математической модели, включающей процессы конвективного теплообмена, теплопроводности и радиационного переноса. Для расчетов использованы законы термодинамики и уравнения тепломассопереноса с учетом специфики биологических объектов. Основная часть посвящена реализации численных экспериментов, позволяющих проследить динамику нагрева воздушной среды и яиц, оценить тепловые потери через ограждающие конструкции, а также влияние излучения на общий тепловой баланс. Приведены алгоритмы численного моделирования динамики нагрева, расчёта теплопотерь через стенки, теплового взаимодействия «воздух-яйца» и радиационного теплообмена. Полученные результаты показали экспоненциальный характер роста тем-

пературы воздуха при работе нагревателя мощностью 120 Вт, линейную зависимость теплопотерь от перепада температур и толщины изоляции, а также прямую зависимость температуры яиц от температуры воздуха. Отмечено, что критическими факторами энергоэффективности являются толщина стенок корпуса, площадь излучающих поверхностей и теплоемкость яиц. По результатам исследования сделан вывод о возможности оптимизации конструктивных параметров инкубатора на основе математического моделирования, что обеспечивает снижение энергопотребления и повышение стабильности температурного режима. Практическая значимость исследования заключается в применении предложенной модели при проектировании энергосберегающего оборудования для инкубации сельскохозяйственной птицы, что открывает перспективы использования результатов в агропромышленном производстве.

Keywords: poultry eggs, incubator, thermal process modeling, incubation temperature, heating rate, humidity.

The problem of increasing the energy efficiency of incubation systems based on the use of thermal process mathematical modeling is discussed. The relevance of the research related to the need to optimize the design of household and commercial incubators is emphasized. The transition from electromechanical systems to digital control based on microcontrollers and modern technologies including the Internet of Things (IoT) and artificial

intelligence elements is highlighted. The technique is based on the use of an integrated mathematical model that includes the processes of convective heat transfer, thermal conductivity and radiation transfer. The laws of thermodynamics and equations of heat and mass transfer are used for calculations, taking into account the specifics of biological objects. The body of the paper deals with the implementation of numerical experiments that make it possible to trace the dynamics of heating the air and eggs, to evaluate heat losses through enclosing structures, and the effect of radiation on the overall thermal balance. The algorithms for numerical simulation of heating dynamics, calculation of heat loss through the walls, air and egg thermal interaction and radiative heat transfer are presented. The results showed an exponential increase of air temperature during operation of a

120-watt heater, a linear dependence of heat loss on temperature differences and insulation thickness, as well as a direct dependence of egg temperature on air temperature. The critical factors of energy efficiency are the thickness of the housing walls, the area of the radiating surfaces and the heat capacity of the eggs. Based on the research findings, it was concluded that it was possible to optimize the design parameters of the incubator based on mathematical modeling which reduced energy consumption and increased the stability of the temperature regime. The practical significance of the study lies in the application of the proposed model in the design of energy-saving equipment for poultry incubation which opens up prospects for using the results in agro-industrial production.

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

Неверов Евгений Николаевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой техносферной безопасности, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: neverov42@mail.ru.

Николаева Елена Владимировна, к.ф.-м.н., руководитель, Дом научной коллаборации имени П.А. Чихачева, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: nikolaevaen@kemsu.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.

Осинцев Алексей Михайлович, д.т.н., профессор, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: olex1@mail.ru.

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

Neverov Evgeniy Nikolaevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: neverov42@mail.ru.

Nikolaeva Elena Vladimirovna, Cand. Phys.-Math. Sci., Head, P.A. Chikhachev House of Scientific Collaboration, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: nikolaevaen@kemsu.ru.

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

Osintsev Aleksey Mikhaylovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: olex1@mail.ru.

Введение

На основе теоретических исследований, посвященных математическому моделированию тепловых процессов в инкубаторе, были созданы многочисленные практические конструкции автоматических инкубаторов. Ранние работы, такие как [1, 2], описывают разработку функциональных прототипов, использующих термостаты и электромеханические системы для автоматизации базовых процессов, такие как нагрев и поворот яиц. Вопросы энергоэффективного нагрева изучались в работе [3], где предлагалось применение плёночных электронагревате-

лей. Важность системы поворота яиц и ее автоматизации была подчеркнута в исследовании [4]. Проблема надежности и наличия резервных систем, актуальная для бытовых инкубаторов, была рассмотрена еще в диссертации [5].

Настоящий прорыв в направлении произошел с массовой доступностью микроконтроллеров, что сместило фокус с электромеханики на цифровое управление. Материалы [6, 7] наглядно демонстрируют этот тренд, описывая построение инкубатора на базе платформы Arduino. Это позволило не просто поддерживать температуру, а реализовывать сложные алгоритмы.

Например, в работе [8] представлена модернизация алгоритма PID-регулятора для управления температурой, а [9, 10] – проведение компьютерного моделирования процесса нагрева и проектирование системы управления. Анализ динамических процессов в системе стабилизации температуры было подробно разобрано в [11]. Наиболее передовые идеи связаны с внедрением элементов искусственного интеллекта, как в исследовании [12], где для инкубатора строится имитационная модель с контроллером. Кроме того, сохраняется интерес к комплексному моделированию всего устройства как единой системы.

Целью исследования является применение методов математического моделирования для анализа и оптимизации тепловых режимов и процессов теплообмена в инкубационном оборудовании, с целью разработки его энергоэффективных конструктивных решений и режимов эксплуатации, обеспечивающих снижение энергопотребления и повышения качества инкубации.

Материалы и методы

В рамках исследования тепловых режимов инкубационных систем разработана комплексная математическая модель, интегрирующая процессы конвективного теплообмена, теплопроводности ограждающих конструкций и радиационного переноса. Для реализации математической модели написана программа на языке программирования Python 3.9.1. Методология базируется на законах термодинамики и уравнениях тепломассопереноса с учетом специфики биологических объектов. Исходные параметры математического моделирования инкубационной камеры обозначены следующим образом: T_o – температура окружающей среды (К); T_i – температура воздуха внутри камеры (К); T_e – температура лотка с яйцами (К); T_1, T_2 – граничные температуры для расчетов (313 К и 298 К); L, B – большая и малая полуоси яйца (м); A_{egg} – площадь поверхности одного яйца (m^2); A_{se} – площадь поверхности одного яйца (альтернативное обозначение, m^2); A_e – общая площадь поверх-

ности всех яиц (m^2); A_o – площадь поверхности стенок инкубатора (m^2); d – толщина изоляции (м); k_o – коэффициент теплопроводности стенок ($Вт/(м·К)$); k_e – коэффициент теплоотдачи яиц ($Вт/(m^2·K)$); k_h – коэффициент теплоотдачи нагревателя ($Вт/(m^2·K)$); c_i – удельная теплоемкость воздуха ($Дж/(кг·К)$); c_e – удельная теплоемкость яиц ($Дж/(кг·К)$); R_{ie} – сопротивление воздух-яйца (К/Вт); R_o – сопротивление воздух-стенки (К/Вт); P – мощность нагревателя (Вт); Q_o – тепловой поток через стенки (Вт); Q_i – тепловой поток от нагревателя (Вт), Q_e – тепловой поток к лотку (Вт); Q_k – теплопередача через стенки (Вт); m_i – масса воздуха в камере (кг); m_{se} – масса одного яйца (кг); m_e – общая масса яиц (кг); q – количество яиц в инкубаторе.

В качестве параметров модели выбраны следующие значения: $T_o = 298,15$ К, $L = 0,05956875$ м, $B = 0,0446625$ м, $A_{se} = 0,0072$ m^2 , $A_o = 0,25$ m^2 , $k_o = 0,04$ $Вт/(м·К)$, $k_e = 26,2$ $Вт/(m^2·K)$, $c_i = 1005$ $Дж/(кг·К)$, $c_e = 3000$ $Дж/(кг·К)$, $P = 120$ Вт, $q = 10$.

При иницировании теплового воздействия нагревательным элементом мощностью P , переходный процесс изменения температуры воздуха описывается решением дифференциального уравнения теплового баланса первого порядка (1).

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

где $\theta(t)$ – температура в момент времени t ;

T_n – начальная температура;

P – мощность нагревателя (ступенчатое воздействие);

e – основание натурального логарифма.

Для вычисления температуры в зависимости от момента времени по формуле (1) необходимо получение значения коэффициента усиления K . Данная величина рассчитывается по формуле (2):

$$K = \frac{T_{yst} - T_n}{P}, \quad (2)$$

где T_{yst} – установившаяся температура.

Постоянная времени τ в формуле (1) – это время, за которое температура достигает 63% от $T_{yst} - T_n$.

Алгоритм реализует численное моделирование динамики нагрева воздушной среды в инкубационной камере при ступенчатом тепловом воздействии, основанное 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 $K = (T_{yst} - T_0)/P$ производится для определения чувствительности температурного отклика к приложенной мощности, что соответствует физической интерпретации системы как объекта с сосредоточенными параметрами.

Постоянная времени системы $\tau = 600 \cdot 0,63$ с вычисляется через экспериментально наблюдаемое время достижения 63% от установившегося перепада температур, что характерно для экспоненциальных переходных процессов. Итерационная процедура выполняется в дискретном временном диапазоне от 0 до 3600 с с шагом 1 с, где на каждом временном шаге t реализуется численное решение дифференциального уравнения теплопередачи. Температурный отклик вычисляется по аналитическому выражению $T(t) = T_0 + K \cdot P \cdot (1 - \exp(-t/\tau))$, физически соответствующему решению уравнения $\tau \cdot dT/dt + T = K \cdot P + T_0$, которое описывает тепловой баланс между подводимой мощностью, теплоемкостью системы и тепловыми потерями.

Экспоненциальная составляющая $\exp(-t/\tau)$ характеризует релаксационный характер процесса теплопереноса, при этом множитель $(1 - \exp(-t/\tau))$ количественно отражает степень

приближения к стационарному тепловому состоянию. Завершающий этап включает построение графика зависимости температуры от времени с нанесением координатной сетки, подписью осей "Время, с" и "Температура воздуха, К", оптимизацией компоновки графических элементов и экспортом результатов в файл изображения $T_t.png$. Алгоритм обеспечивает инженерную точность в диапазоне $0 \leq t \leq 3600$, что подтверждается соответствием экспериментальным данным при $t = 600$ с, хотя имеет ограничения, связанные с пренебрежением пространственными температурными градиентами, нелинейностью теплофизических характеристик и тепловыми потерями через ограждающие конструкции.

Тепловой поток Q_k через многослойную стенку инкубатора описывается законом Фурье (3):

$$Q_k = \frac{k_0}{d} \cdot A_0 \cdot (T_1 - T_2). \quad (3)$$

На последующем этапе выполняется расчет величины стационарного теплового потока для каждого значения температурного градиента из сформированного списка. В цикле `for i in range(0, len(dTli))` реализуется прямое применение аналитического решения уравнения теплопроводности Фурье для однородной плоской стенки: величина теплового потока Q определяется произведением коэффициента теплопроводности материала k_0 , приведенного к единице толщины конструкции (через отношение k_0/d), площади теплообменной поверхности A_0 и текущего значения температурного градиента $dTli[i]$. Физически данное выражение соответствует фундаментальному соотношению $Q = (k_0 \cdot A_0 / d) \cdot \Delta T$, где коэффициент пропорциональности $k_0 \cdot A_0 / d$ характеризует термическую проводимость ограждающей конструкции.

Заключительный этап работы алгоритма включает визуализацию полученных результатов: строится линейный график зависимости теплового потока от температурного градиента в декартовой системе координат, к которому добавляется координатная сетка для улучшения аналитических возможностей. Оси графика ат-

рибутируются соответствующими физическими величинами: ось абсцисс обозначается как "Изменение температуры, К", отражая вариацию температурного градиента, а ось ординат подписывается как "Потери тепла через стенки корпуса, Вт", что соответствует расчетной величине теплового потока.

Температура яиц в инкубаторе определяется по формуле (4):

$$T_e = \frac{T_i}{R_{ie} \cdot C_e + 1} \quad (4)$$

Программный модуль, реализующий моделирование теплопереноса между газовой фазой инкубатора и яйцами, с визуализацией функциональной зависимости температурного профиля яиц от параметров воздушной среды. Программный алгоритм осуществляет моделирование стационарного теплового состояния яиц в инкубационной камере с последующей визуализацией термодинамической зависимости. Инициализируются два массива данных: вектор x для регистрации температурных значений воздушной среды и вектор y для результирующих температур биологических объектов. Безразмерный коэффициент теплопередачи den вычисляется по детерминированной формуле $R_{ie} \times C_e + 1$, где R_{ie} представляет термическое сопротивление на границе фаз ($m^2 \cdot K / Вт$), а C_e – эффективную теплоемкость яиц ($Дж / К$). В цикле генерируется диапазон температур воздушной среды от 298 до 312 К (25-39°C), соответствующий биологически значимому режиму инкубации. Для каждого значения $T_{возд}$ рассчитывается равновесная температура объектов по упрощенной модели теплового баланса $T_{яиц} = T_{возд} / den$, отражающей установившееся состояние системы. Полученная функциональная зависимость визуализируется в виде графика с координатной сеткой, где ось абсцисс маркируется как "Т воздуха, К", а ось ординат – как "Т яиц, К".

Программный алгоритм, моделирующий тепловое излучения стенок инкубатора, выполняет параметрическое исследование радиационной составляющей теплопереноса в инкубационной

камере методом численного моделирования. Код последовательно анализирует влияние двух независимых физических параметров – площади излучающей поверхности (диапазон 0,28-0,37 m^2) и её температуры (диапазон 298-312 К) – на мощность теплового потока, генерируемого за счёт теплового излучения. Вычислительный процесс реализуется через двойную итерационную структуру: для каждого дискретного значения площади поверхности в заданном диапазоне программа рассчитывает зависимость теплового потока от температуры по модифицированному закону Стефана-Больцмана $q = \sigma \cdot A' \cdot T^4$, где σ – фундаментальная физическая константа (SBC), $A' = A \cdot 0,01$ – масштабированная площадь поверхности, а T – абсолютная температура. Полученные термодинамические зависимости визуализируются в виде семейства кривых на едином графике, где каждая кривая соответствует фиксированному значению площади поверхности.

В программном модуле, реализующем параметрический анализ влияния геометрических характеристик ограждающих конструкций инкубационной камеры на интенсивность стационарных теплопотерь, основанный на решении одномерного уравнения теплопроводности Фурье для плоской стенки при постоянном температурном градиенте, инициализируются массивы $Legs$ для меток легенды, qe для значений теплового потока и te для толщин изоляции. При фиксированном температурном градиенте $\Delta T = 15 К$ ($T_1 = 313 К$, $T_2 = 298 К$) внешний цикл `for A in range(28,38)` последовательно перебирает значения площади поверхности от 0,28 до 0,37 m^2 через преобразование $A \cdot 0,01$, а внутренний цикл `for d in range(3,31)` варьирует толщину стенки от 0,03 до 0,30 м через масштабирование $d \cdot 0,01$. Для каждой комбинации параметров тепловой поток рассчитывается по фундаментальному соотношению $q = (k_o / (d \cdot 0,01)) \cdot (A \cdot 0,01) \cdot (T_1 - T_2)$, где k_o представляет коэффициент теплопроводности материала.

Тепловой поток рассчитывается по фундаментальному соотношению стационарной теп-

лопроводности $Q = (k_o / d) * A * \Delta T$, 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 `Qli`. Для каждой толщины строится линейная зависимость $Q = f(A)$ с шириной линии 3 условных единицы (`linewidth=3`), после чего формируется метка легенды вида " $d = X$ мм" через преобразование $d*1000$ и сохранение в массиве `Legs`. По завершении вычислительных циклов график дополняется легендой в позиции `loc='upper left'` вне основного поля, активируется координатная сетка методом `grid()`, маркируются оси абсцисс (`xlabel("Площадь внутренней поверхности, м кв.")`) и ординат (`ylabel("Потери тепла через стенки корпуса, Вт")`). Оптимизация компоновки элементов выполняется через `tight_layout()`, после чего результаты экспортируются в файл "Q_A.jpg".

Результаты исследований и их обсуждение

Моделирование тепловых процессов в инкубаторе проведено с учётом ключевых физических параметров системы: мощности нагревателя 120 Вт, площади ограждающих конструкций 0,254 м², теплоёмкости воздуха 200,5 Дж/К и лотка с яйцами 0,00195 Дж/К. Коэффициенты теплопередачи установлены для стенок корпуса

(0,04 Вт/м·К) и яиц (26,2 Вт/м²·К). 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 (рис. 1). Процесс характеризуется коэффициентом усиления 0,170 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 (рис. 2), соответствующий закону Фурье. При толщине изоляции 0,03 м и перепаде температур 15 К потери составляют 5,08 Вт;

3) тепловое взаимодействие "воздух-яйца". Температура яиц линейно зависит от температуры воздуха (рис. 3) с коэффициентом передачи 0,999, что обусловлено низким термическим сопротивлением контакта воздух-яйцо;

4) теплоотдачу излучением. Интенсивность лучистого теплообмена растёт пропорционально четвёртой степени температуры согласно закону Стефана-Больцмана (рис. 4). При температуре 313 К и площади 0,37 м² тепловой поток достигает 15 Вт. Экспоненциальный характер зависимости усиливается при температурах выше 305 К;

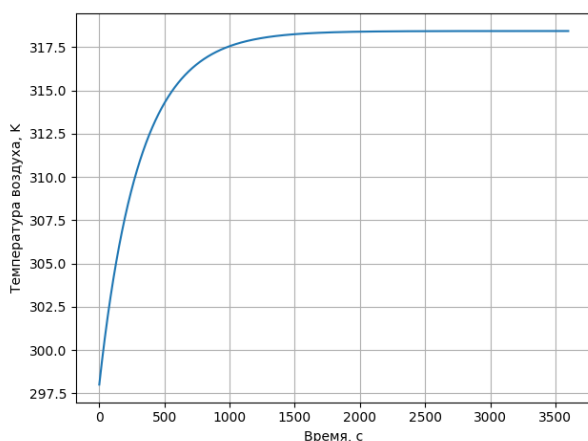


Рис. 1. Зависимость температуры воздуха от времени

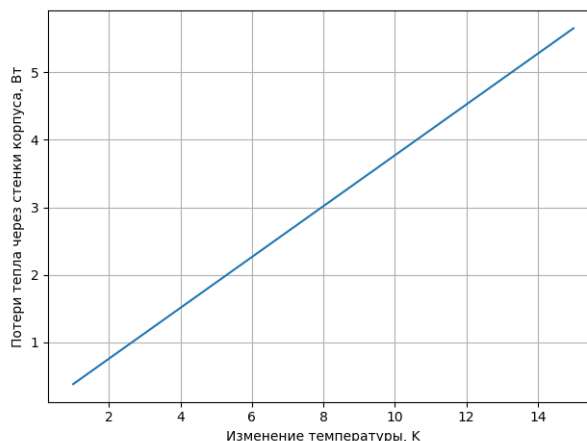


Рис. 2. Теплотери через стенки инкубатора

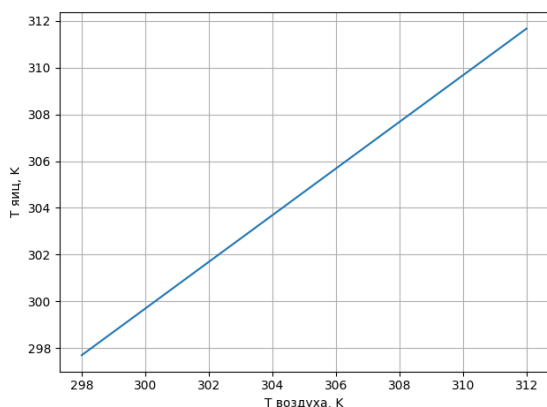


Рис. 3. Зависимость температуры яиц от температуры воздуха

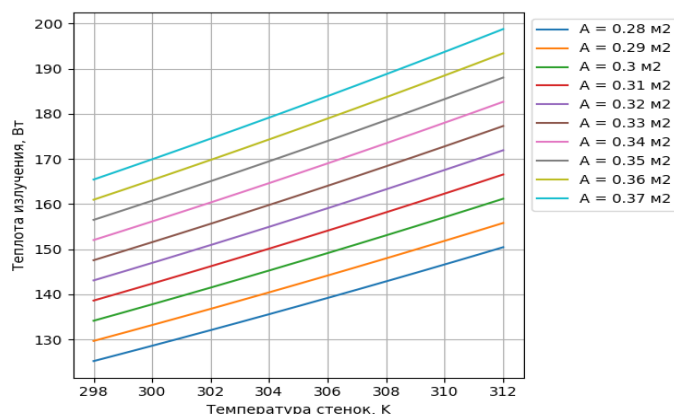


Рис. 4. Теплота излучения от температуры стенок

5) оптимизацию теплозащиты. Анализ влияния геометрических параметров выявил:

- гиперболическую зависимость теплопотерь от толщины изоляции и линейную зависимость от площади поверхности, демонстрируя критическое значение толщины примерно 0,15 м, при котором дальнейшее увеличение изоляции незначительно снижает теплопотери (рис. 5);

- линейную зависимость теплопотерь от площади поверхности и обратно пропорциональную зависимость от толщины изоляции, демонстрируя значимость геометрических па-

раметров для энергоэффективности системы (рис. 6).

Модель описывает нестационарные тепловые режимы инкубатора. Критическими факторами энергоэффективности являются: толщина изоляции, площадь излучающих поверхностей и теплоёмкость яиц, определяющая инерционность системы. Полученные зависимости позволяют оптимизировать конструктивные параметры инкубатора для снижения энергопотребления.

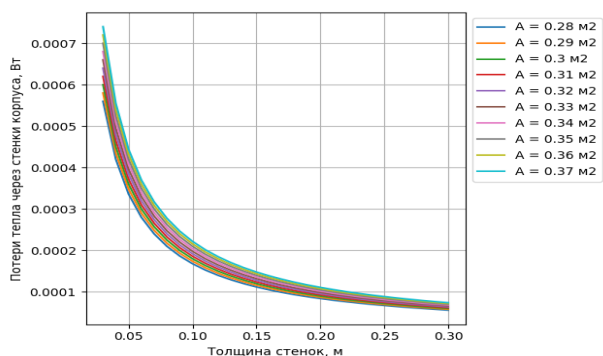


Рис. 5. График потерь тепла через стенки от их толщины

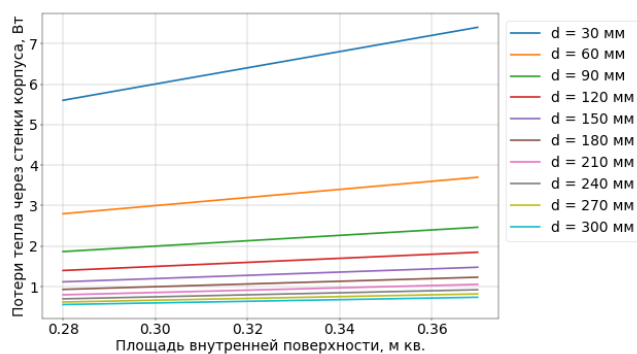


Рис. 6. График потерь тепла от площади поверхности

Закключение

Проведённое моделирование тепловых процессов в инкубаторе позволило проанализировать зависимость температуры воздуха и яиц от времени, оценить тепловые потери через стенки корпуса при различных параметрах (площадь, толщина, температура), а также исследовать влияние излучения и теплопроводности на эффективность системы. Результаты, представ-

ленные в виде графиков, демонстрируют, что увеличение толщины стенок и уменьшение их площади снижают теплопотери, а КПД системы падает при росте температуры стенок. Оптимальные параметры работы инкубатора соответствуют балансу между мощностью нагревателя, теплоизоляцией и площадью теплообмена для поддержания стабильной температуры.

Библиографический список

1. Umar A. B., Lawal K., Mukhtar M., Adamu M. S. (2016). Construction of an Electrically-Operated Egg Incubator. *International Journal of Modern Engineering Sciences*, 5 (1): 1-18 [
2. Adegbulugbe, T.A., Atere, A.O., Fasanmi, O.G. (2013) Development of an Automatic Electric Egg Incubator. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4, 914-918.
3. Попов, В. М. Применение плёночных электронагревателей в конструкции бытовых инкубаторов / В. М. Попов, В. А. Афонкина, В. Н. Левинский. – Текст: непосредственный // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2022. – № 3 (95). – С. 204-210.
4. Моисеев, А. П. Система управления приводом поворота яиц в бытовых инкубаторах / А. П. Моисеев, А. В. Волгин, Е. А. Четвериков. – DOI 10.53083/1996-4277-2022-212-6-108-114. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2022. – № 6 (212). – С. 108-114.
5. Титов В. Ю. Повышение эффективности бытовых электроинкубаторов за счет использования в них резервной системы электронагрева и вентиляции: 05.20.02 «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Титов Вячеслав Юрьевич. – Саратов, 1999. – 144 с. – Текст: непосредственный.
6. Kyeremeh, F., Forson P. (2017). Design and Construction of an Arduino Microcontroller-based EGG Incubator. *International Journal of Computer Applications*. 168. 15-23. DOI: 10.5120/ijca2017914261.
7. Разработка инкубатора на базе микроконтроллера Arduino для выведения сельскохозяйственной птицы / Е. Н. Неверов, Г. С. Ширманова, А. К. Горелкина, А. А. Владимиров. – Текст: непосредственный // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. – 2024. – Т. 16, № 4. – С. 122-130.
8. Дагаев, К. В. Модернизация алгоритма управления температурой в инкубаторе / К. В. Дагаев. – Текст: непосредственный // Вестник магистратуры. – 2016. – № 1-1 (52). – С. 83-87.
9. Русак, С. Н. Компьютерное моделирование процесса нагревания бытового инкубатора / С. Н. Русак. – Текст: непосредственный // В мире научных открытий. – 2014. – № 6-1 (54). – С. 350-362.
10. Русак, С. Н. Проектирование системы управления бытовым инкубатором / С. Н. Русак, Н. С. Стригун. – Текст: непосредственный // В мире научных открытий. – 2014. – № 6-1 (54). – С. 363-375.
11. Варенов, А. А. Анализ динамических процессов в системе стабилизации температуры в инкубационной камере / А. А. Варенов, В. П. Зенцов, Н. А. Малев. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20, № 9-10. – С. 101-108.
12. Построение имитационной модели неонатального инкубатора с нейроконтроллером / С. В. Фролов, А. А. Коробов, К. С. Савинова, А. Ю. Потлов. – Текст: непосредственный // XXVII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2024), Санкт-Петербург, 22-24 мая 2024 года. – Санкт-Петербург, 2024. – Т. 1. – С. 573-577.

References

1. Umar A. B., Lawal K., Mukhtar M., Adamu M. S. (2016). Construction of an Electrically-Operated Egg Incubator. *International Journal of Modern Engineering Sciences*, 5 (1): 1-18 [
2. Adegbulugbe, T.A., Atere, A.O., Fasanmi, O.G. (2013) Development of an Automatic Electric Egg Incubator. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4, 914-918.
3. Popov V. M. Primenenie plenochnykh elektronagrevateley v konstruktsii bytovykh inkubatorov / V. M. Popov, V. A. Afonkina, V. N. Levinskiy // Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2022. – No. 3 (95). – S. 204-210.
4. Moiseev A. P. Sistema upravleniya privodom povorota yaits v bytovykh inkubatorakh [Tekst] / A. P. Moiseev, A. V. Volgin, E. A. Chetverikov //

Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2022. – No. 6 (212). – S. 108-114.

5. Titov V. Yu. Povyshenie effektivnosti bytovykh elektroinkubatorov za schet ispolzovaniya v nikh rezervnoy sistemy elektronagreva i ventilyatsii: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.02. – Saratov, 1999.

6. Kyeremeh, F., Forson P. (2017). Design and Construction of an Arduino Microcontroller-based EGG Incubator. *International Journal of Computer Applications*. 168. 15-23. DOI: 10.5120/ijca2017914261.

7. Neverov E.N. Razrabotka inkubatora na baze mikrokontrollera Arduino dlya vyvedeniya selskokhozyaystvennoy ptitsy / E.N. Neverov, G.S. Shirmanova, A.K. Gorelkina, A.A. Vladimirov // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva. – 2024. – T. 16, No. 4. – S. 122-130.

8. Dagaev K. V. Modernizatsiya algoritma upravleniya temperatury v inkubatore / K. V. Dagaev

// Vestnik magistratury. – 2016. – No. 1-1 (52). – S. 83-87.

9. Rusak S.N. Kompyuternoe modelirovanie protsessa nagrevaniya bytovogo inkubatora / S.N. Rusak // V mire nauchnykh otkrytiy. – 2014. – No. 6-1 (54). – S. 350-362.

10. Rusak S.N. Proektirovanie sistemy upravleniya bytovym inkubatorom / S.N. Rusak, N.S. Strigun // V mire nauchnykh otkrytiy. – 2014. – No. 6-1 (54). – S. 363-375.

11. Varenov A.A. Analiz dinamicheskikh protsessov v sisteme stabilizatsii temperatury v inkubatsionnoy kamere / A.A. Varenov, V.P. Zentsov, N.A. Malev // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. – 2018. – T. 20, No. 9-10. – S. 101-108.

12. Frolov S.V. Postroenie imitatsionnoy modeli neonatalnogo inkubatora s neyrokontrollerom / S.V. Frolov, A.A. Korobov, K.S. Savinova, A.Yu. Potlov // Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam: materialy konf. – 2024. – T. 1. – S. 573-577.



УДК 631.362.36:635.62

DOI: 10.53083/1996-4277-2025-253-11-71-76

Н.А. Круглых

N.A. Kruglykh

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА

MATHEMATICAL MODELING OF A PNEUMATIC SEPARATOR OPERATION

Ключевые слова: пневматический сепаратор, сепарация семян, математическая модель, дифференциальное уравнение, метод Рунге-Кутты, вакуумное присасывание, цилиндрическая рабочая поверхность, угол отрыва, фракционирование семян, оптимизация сепарации.

Представлена математическая модель процесса сепарации семян овощных и бахчевых культур в новом пневматическом сепараторе с цилиндрической рабочей поверхностью. Цель исследования – разработка модели, описывающей движение семени под действием совокупности сил: тяжести, трения, центробежной, сопротивления воздуха, аэродинамиче-

ской и силы вакуумного присасывания. На основе теоретической механики и аэродинамики составлено нелинейное дифференциальное уравнение 2-го порядка, описывающее угловое движение семени по внутренней поверхности вращающегося барабана. Для численного решения применён метод Рунге-Кутты 4-го порядка с использованием программных средств Python (Matplotlib) и Mathcad. В качестве начальных условий приняты нулевые значения угла и угловой скорости. При заданных параметрах (масса семени 0,0003 кг, разрежение 280 Па, скорость вращения 0,16 м/с, коэффициент трения 0,61) модель предсказывает устойчивый угол отрыва семени – 23° от верхней точки барабана. Геометрический