

Информация о владельце:

ФИО: Махаева Наталья Юрьевна

Должность: проректор по учебной и воспитательной работе, молодежной политике ФГБОУ ВО «Ярославский ГАУ»

УЛК 631.152.001.57:636:612.014.464:619:616.995.1

DOI: 10.35694/YARCX.2025.70.2.013

Дата подписания: 30.09.2025 10:55:35

Уникальный программный ключ:

fa349ae3f25a45643d89cfb671b7284ea10f48e8

ПОСТРОЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИМУЛЯЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОЗОНА НА ЯЙЦА ГЕЛЬМИНТОВ (НА ПРИМЕРЕ *ASCARIDIA GALLI*)

Артем Викторович Кузин¹, Владимир Викторович Шмигель²,
Елена Владимировна Шешунова³

^{1, 2, 3}Ярославский государственный аграрный университет, Ярославль, Россия

¹artcuz@bk.ru, ORCID 0000-0002-5196-872X

²v.shmigel@yarcx.ru, ORCID 0000-0001-7265-831X

³e.sheshunova@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-7805-5656

Реферат. Разработаны математическая и компьютерная модели процесса разрушения оболочки яйца аскариды *Ascaridia galli* под действием озона, учитывающие многослойную структуру оболочки (липидный, хитиновый, белковый слои), кинетику окислительных реакций и динамику изменения пористости. Математическая модель основана на системе дифференциальных уравнений, включающей модифицированное уравнение Фика с реакционным членом для описания диффузии озона через слои оболочки, закон Хабера – для анализа зависимости «доза – эффект» и уравнение Аррениуса, учитывающее влияние температуры на скорость реакций. Для каждого слоя оболочки описаны специфические окислительные процессы: перекисное окисление липидов, деградация хитина за счёт разрыва β -1,4-гликозидных связей и денатурация белков, включая окисление цистеина и тирозина. Компьютерная модель дополняет математические расчёты возможностью визуализации пространственного распределения озона в оболочке, степени повреждения каждого слоя с цветовой индикацией и динамики изменения пористости в процессе озонирования. Результаты моделирования демонстрируют нелинейную зависимость времени дезинвазии от концентрации озона, температуры и влажности. Установлено, что критическим фактором эффективности является повреждение хитинового слоя, определяющего механическую прочность оболочки. Оптимальная концентрация озона составляет 50–150 ppm, при этом дальнейшее увеличение концентрации приводит к снижению экономической эффективности из-за побочных реакций. Повышение температуры на 10–20°C сокращает требуемую дозу озона в 1,5–2,0 раза благодаря ускорению окислительных процессов. Практическая значимость исследования заключается в возможности точного прогнозирования режимов озонной обработки для дезинвазии воды, почвы и сельскохозяйственных объектов. Разработанный алгоритм расчёта летальных доз озона может быть интегрирован в системы автоматического управления установками озонирования. Комплексное использование математической и компьютерной моделей позволяет не только оптимизировать параметры воздействия (концентрацию, время экспозиции, температурный режим), но и визуализировать ключевые этапы разрушения оболочки, что существенно упрощает подбор условий для конкретных практических задач.

Ключевые слова: озон, *Ascaridia galli*, яйца гельминтов, математическое моделирование, уравнение Фика, закон Хабера, кинетика окисления, дезинвазия

CONSTRUCTION OF A COMPUTER SIMULATION OF THE EFFECT OF OZONE ON HELMINTH EGGS (USING THE EXAMPLE OF *ASCARIDIA GALLI*)

Artem V. Cuzin¹, Vladimir V. Shmigel², Elena V. Sheshunova³

^{1, 2, 3}Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Russia

¹artcuz@bk.ru, ORCID 0000-0002-5196-872X

²v.shmigel@yarcx.ru, ORCID 0000-0001-7265-831X

³e.sheshunova@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-7805-5656

Abstract. Mathematical and computer models of the process of destruction of the *Ascaridia galli* egg shell under the influence of ozone have been developed, taking into account the multilayer structure of the shell (lipid, chitin, protein layers), the kinetics of oxidative reactions and the dynamics of porosity changes.

The mathematical model is based on a system of differential equations, including a modified Fick's equation with a reaction term to describe the diffusion of ozone through the shell layers, Haber's law to analyze the "dose – effect" relationship, and the Arrhenius equation, which takes into account the effect of temperature on the rate of reactions. Specific oxidative processes are described for each shell layer: lipid peroxidation, chitin degradation due to the breaking of β -1.4-glycosidic bonds, and protein denaturation, including the oxidation of cysteine and tyrosine. The computer model complements the mathematical calculations with the ability to visualize the spatial distribution of ozone in the shell, the degree of damage to each layer with color indication and the dynamics of porosity changes during ozonation. The simulation results demonstrate a nonlinear dependence of the disinvasion time on the ozone concentration, temperature and humidity. Damage to the chitin layer, which determines the mechanical strength of the shell, has been found to be a critical efficiency factor. The optimal ozone concentration is 50–150 ppm, while a further increase in concentration results in a decrease in economic efficiency due to side reactions. Increasing the temperature by 10–20°C reduces the required dose of ozone by 1.5–2.0 times due to the acceleration of oxidative processes. The practical significance of the study lies in the ability to accurately predict ozone treatment modes for disinvasion of water, soil and agricultural objects. The developed algorithm for calculating lethal doses of ozone can be integrated into automatic control systems for ozonation plants. The complex use of mathematical and computer models allows not only to optimize the impact parameters (concentration, exposure time, temperature mode), but also to visualize the key stages of shell destruction, which greatly simplifies the selection of conditions for specific practical tasks.

Keywords: *ozone, Ascaridia galli, helminth eggs, mathematical modeling, Fick's equation, Haber's law, oxidation kinetics, disinvasion*

Введение. Проблема гельминтозов сохраняет свою актуальность для медицины, ветеринарии и агропромышленного комплекса, несмотря на существующие методы профилактики и контроля. Особую сложность представляет дезинвазия объектов окружающей среды, поскольку яйца гельминтов, в частности *Ascaridia galli*, обладают исключительной устойчивостью к внешним воздействиям благодаря своей сложной многослойной оболочке. Традиционные методы обеззараживания часто оказываются недостаточно эффективными против таких устойчивых форм, что требует разработки новых подходов.

Озон, как мощный окислитель, представляет собой перспективную альтернативу существующим методам дезинвазии. Его высокая реакционная способность позволяет потенциально преодолевать защитные барьеры яиц гельминтов. Однако механизмы воздействия озона на многослойную структуру оболочки яиц остаются недостаточно изученными, что затрудняет оптимизацию параметров обработки и прогнозирование её эффективности.

Целью данной работы является комплексное исследование процесса разрушения оболочки яйца аскариды под действием озона через разработку взаимодополняющих математической и компьютерной моделей. Математическая модель описывает кинетику процесса с учётом многослойной структуры оболочки (липидного, хитинового и белкового слоёв), а также влияния ключевых параметров: температуры, влажности и концентрации озона. В основе моделирования лежат фундаментальные физико-химические принципы, включая модифицированное уравнение Фика с ре-

акционным членом для описания диффузии озона, закон Хабера – для анализа зависимости «доза – эффект» и уравнение Аррениуса – для учёта температурного фактора.

Разработанная компьютерная модель служит важным дополнением к математическому аппарату, предоставляя инструмент для визуализации и анализа трёх ключевых аспектов процесса: пространственного распределения озона в оболочке, степени повреждения каждого структурного слоя и динамики изменения пористости оболочки в ходе обработки. Такой комплексный подход позволяет не только глубже понять механизмы окислительного повреждения, но и создаёт основу для оптимизации режимов дезинвазии в практических условиях.

Методика. В работе был использован метод математического моделирования с использованием уравнения Фика с реакционным членом, закона Хабера и уравнения Аррениуса для составления компьютерной модели в среде Spyder на языке Python, с использованием библиотек Numpy и Matplotlib.

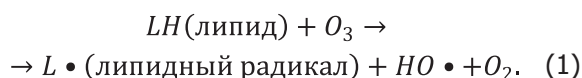
Результаты. Для построения модели, определяющей концентрацию озона, необходимую для гибели яйца аскариды, нужно учитывать его повышенную устойчивость по сравнению с взрослой особью. Яйца гельминтов защищены плотной оболочкой (хитиновой или белковой), что требует более высокой дозы озона для повреждения. Практические исследования показывают, что для яиц гельминтов требуются дозы в 2–5 раз выше, чем для взрослых особей [1].

Структура оболочки яйца аскариды – липопротеиновая, многослойная (липидный, хитино-

вый и белковый слой) [2]. Чтобы достичь зародыша, озон должен разрушить все слои.

Рассмотрим то, как озон последовательно разрушает слои. Липидный слой будет подвержен перекисному окислению. Перекисное окисление – это цепная реакция окислительной дегградации липидов, в первую очередь, ненасыщенных жирных кислот (например, арахидоновой или линолевой), входящих в состав клеточной мембраны [3]. Процесс инициируется активными формами кислорода, включая O_3 , и приводит к нарушению структуры мембран, потере их барьерной функции и гибели клетки.

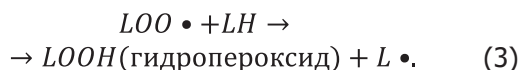
Данная реакция проходит в три стадии. Озон или другие окислители ($\bullet OH$, $O_2\bullet^-$) атакуют двойные связи в липидах, отрывая атом кислорода от метиленовой группы ($-CH_2-$):



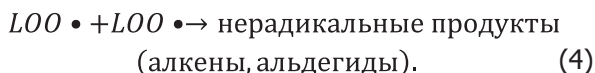
Липидный радикал ($L\bullet$) реагирует с кислородом, образуя липопероксидный радикал ($LOO\bullet$):



Затем $LOO\bullet$ атакует соседние липиды, поражая цепь:



Радикалы реагируют друг с другом, образуя неактивные продукты:



Озон ускоряет перекисное окисление липидов за счёт прямого окисления двойных связей липидов, генерации вторичных АФК ($\bullet OH$, H_2O_2) и образования озонидов [4]. Для яиц *Ascaridia galli* это означает разрушение липидного слоя оболочки, что приводит к потере защиты. Также активируются кальциевые каналы из-за повреждения мембраны, что в конечном итоге означает гибель зародыша из-за окислительного стресса.

Хитиновый слой в оболочке яиц *Ascaridia galli* играет ключевую роль в защите зародыша от внешних воздействий. Озон способен разрушать этот слой, воздействуя на его основу – β -1,4-гликозидные связи между мономерами N-ацетилглюкозамина [5]. Разберём процесс детально.

Хитин – это линейный полисахарид, состоящий из повторяющихся звеньев N-ацетилглюкозамина, соединённых β -1,4-гликозидными связями. В обо-

лочке яиц хитин образует кристаллическую решётку, усиленную водородными связями и белковой матрицей.

Озон атакует хитин по трём основным направлениям:

1. Окисление гликозидных связей приводит к разрыву связей в моносахаридах, что вызывает снижение молекулярной массы хитина, вследствие чего падает механическая прочность слоя [6].

2. Окисление гидроксильных групп ($-OH$) до карбонильных ($C=O$) и карбоновых кислот ($-COOH$), а амидные группы ($-NHCOCH_3$) превращаются в нитрозосоединения и нитраты.

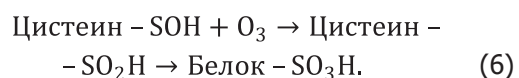
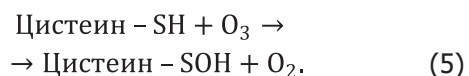
3. Разрушение водородных связей уменьшает кристалличность слоя и повышает пористость оболочки.

Поскольку оболочка яйца становится более хрупкой, она легче разрушается под внешним давлением. Появляются микропоры, через которые озон проникает непосредственно к зародышу. Образующиеся в результате реакции альдегиды (например, глиоксаль) повреждают белки зародыша [7].

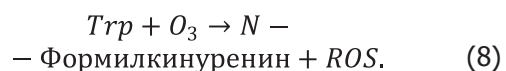
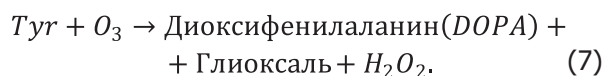
Разрушение озоном хитина – ключевой этап в дезинвазии яиц гельминтов.

Белковый слой в оболочке яиц *Ascaridia galli* состоит из структурных белков (коллагеноподобных, склеротинов) и ферментов, которые критически важны для зародыша. Озон повреждает этот слой, окисляя ключевые аминокислотные остатки, такие как тиолы ($-SH$) в цистеине, ароматические кольца в тирозине, триптофана и фенилаланине, и аминогруппы ($-NH_2$) в лизине и N-концах белков [8].

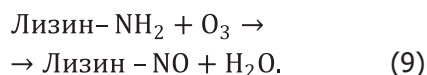
Цистеин – одна из самых чувствительных к озону аминокислот. Реакция идёт через образование сульфеновой ($-SOH$), сульфиновой ($-SO_2H$) и сульфоновой кислот ($-SO_3H$):



Озон атакует бензольные кольца тирозина и индольное кольцо триптофана, образуя токсичные продукты, которые усиливают повреждение:



Реакция с лизином будет выглядеть следующим образом:



Используя закон Хэбера, можно вывести зависимость «доза – эффект» для яиц аскариды при воздействии на неё озоном:

$$D = C_{\text{O}_3} \cdot t = k \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right), \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{aligned} D_{\text{липид}} &= k_{\text{липид}} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) + \gamma \cdot [\text{LOOH}], \\ D_{\text{хитин}} &= C_{\text{O}_3} \cdot t = k_{\text{хитин}} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) + \alpha \cdot [\text{продукты окисления}], \\ D_{\text{белок}} &= k_{\text{белок}} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) + \beta \cdot [\text{карбонилы}] + \delta \cdot [\text{денатур. белки}], \end{aligned} \right. \quad (11)$$

где k – константа скорости окисления; E_a – энергия активации; α , β , γ – коэффициенты вклада продуктов окисления.

Выберем параметры уравнения, исходя из известных в литературе данных (табл. 1).

Используя известные данные, построим модель зависимости летальной дозы от температуры

где D – летальная доза (ppm·мин или мг/л·мин); C_{O_3} – концентрация озона (ppm или мг/л); t – время экспозиции (мин); k – константа, зависящая от устойчивости оболочки; E_a – энергия активации окисления; R – универсальная газовая постоянная; T – температура (°C).

Можно составить систему уравнений «доза – эффект», отражающую воздействие на каждый слой:

среды и концентрации озона (рис. 1). Известно, что при увеличении температуры необходимая для дезинвазии минимальная эффективная доза снижается [11].

Из графика видно, что при повышении температуры требуемая доза озона снижается в 1,5–2,0 раза, что происходит из-за ускорения химических

Таблица 1 – Параметры уравнения для разных слоёв оболочки

Слой	k (отн. ед.)	E_a (кДж/моль)	Маркеры повреждения
Липидный	0,1 [9]	20–40 [10]	LOOH, MDA
Хитиновый	0,05	50–80	Олигосахариды
Белковый	0,2	40–70	Карбонильные группы

Зависимость летальной дозы озона от температуры и концентрации

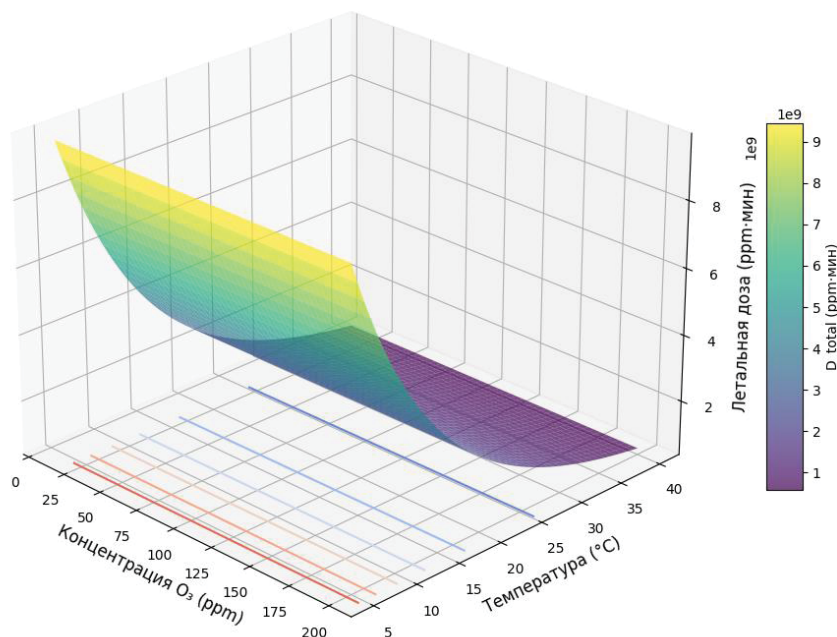


Рисунок 1 – График зависимости летальной дозы от температуры и концентрации озона

реакций окисления при росте константы скорости k по Аррениусу [12].

Также можно сделать вывод о том, что увеличение C_{O_3} свыше 100 ppm даёт меньший прирост эффективности (наклон поверхности графика уменьшается). При высоких концентрациях озон начинает расходоваться на побочные реакции (разложение в воздухе, взаимодействие с нецелевыми молекулами). Поэтому оптимальная концентрация должна находиться в пределах 50–150 ppm. Дальнейшее увеличение концентрации экономически невыгодно. Это согласуется с экспериментальными данными, показывающими, что для гибели яиц гельминтов требуются дозы озона в 2–5 раз выше, чем для взрослых особей.

Данная модель не учитывает влияние влажности, что может снизить E_a для хитина, неоднородность распределения озона в обрабатываемом объёме и индивидуальные различия между яйцами.

Далее, используя кинетическую модель первого порядка, можно вывести интегральную функцию для оценки времени разрушения оболочки яйца:

$$\frac{dC}{dt} = -k \cdot C_{O_3} \cdot S, \quad (12)$$

где C_{O_3} – концентрация озона у поверхности яйца; S – площадь оболочки; k – константа скорости реакции.

$$t = \frac{1}{k \cdot C_{O_3}} \ln \left(\frac{C_0}{C_{\text{крит}}} \right), \quad (13)$$

где $D_{\text{эфф}}$ – минимальная концентрация, приводящая к гибели.

Введём уравнение Фика для градиента концентрации внутри оболочки:

$$\frac{\partial O}{\partial t} = D_{\text{эфф}} \cdot \nabla^2 C - k \cdot C, \quad (14)$$

где $D_{\text{эфф}}$ – эффективный коэффициент диффузии озона в липопротеиновой матрице.

Ранее доказано, что эффективность озона возрастает с увеличением температуры. Добавим в закон Хабера поправку на температуру:

$$k(T) = k_0 \cdot \exp \left(-\frac{E_a}{R(T+\Delta T)} \right). \quad (15)$$

Оболочка яйца гигроскопична. Влажность приводит к ускорению окисления через гидролиз хитина. Введём эмпирическую поправку:

$$k_{\text{real}} = k \cdot (1 + \beta \cdot RH), \quad (16)$$

где RH – относительная влажность; β – коэффициент вклада продуктов окисления.

Построим модель, отражающую повреждение оболочки яйца аскариды по слоям (рис. 2).

Из графика видно, что порядок полного повреждения слоёв следующий: белковый, липидный, хитиновый, что вызвано разницей в коэффициентах вклада продуктов окисления.

Улучшим полученную модель, оптимизировав уравнение Фика для каждого слоя и введя рост утечки, через динамику пористости.

Для каждого слоя i (липидный/хитиновый/белковый):

$$\frac{\partial C_{O_3}^i}{\partial t} = D_i \nabla^2 C_{O_3}^i - k_i C_{O_3}^i [X_i] - \lambda C_{O_3}^i, \quad (17)$$

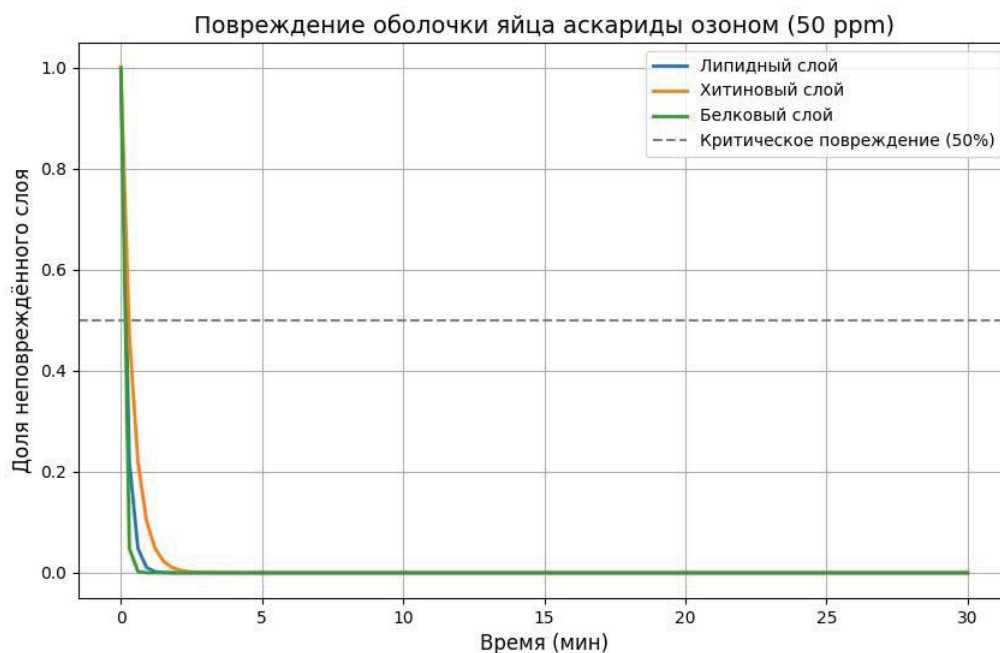


Рисунок 2 – График повреждения слоёв оболочки яйца аскариды озоном, концентрацией 50 ppm

где D_i – коэффициент диффузии озона в слое i ; k_i – константа скорости окисления; $[X_i]$ – концентрация мишени (липиды/хитин/белки); λ_i – коэффициент потерь озона (например, из-за разложения).

Уравнение кинетики повреждений:

$$\frac{d[X_i]}{dt} = -k_i C_{O_3}^i [X_i]. \quad (18)$$

$$[X_i](t = 0) = [X_i]_0. \quad (19)$$

За счёт окисления в слоях будет увеличиваться пористость:

$$\varphi_i(t) = \varphi_0 + \alpha_i \left(1 - \frac{[X_i]}{[X_i]_0}\right), \quad (20)$$

где α_i – эмпирический коэффициент.

Коэффициенты k_i , D_i зависят от температуры по Аррениусу:

$$k_i(T) = k_{i0} \exp\left(\frac{E_a^i}{RT}\right),$$

$$D_i(T) = D_{i0} \exp\left(\frac{E_d^i}{RT}\right). \quad (21)$$

Для учёта влажности введём поправочный член для k_i :

$$k_i^{eff} = k_i \cdot (1 + \beta_i RH). \quad (22)$$

Используя полученные уравнения, построим усовершенствованную компьютерную модель повреждения слоёв оболочки яйца (рис. 3).

Разработанное программное обеспечение представляет собой инструмент для визуализации и анализа процесса озонирования яиц гельминтов. Программа позволяет моделировать и отображать три ключевых параметра воздействия

озона: профиль концентрации озона, повреждение слоёв оболочки и эволюцию пористости. Ось абсцисс всех трёх графиков отображает глубину оболочки яйца. График «Профиль концентрации озона» демонстрирует распределение озона в глубине оболочки яйца и отображает по оси ординат концентрацию озона в среде. График «Повреждение слоёв оболочки» визуализирует степень повреждения различных слоёв оболочки. По оси ординат отображается доля неповреждённых мишеней (в условных единицах от 0 до 1). Цветовая индикация отображает конкретные слои оболочки: синий – повреждение липидного слоя, зелёный – хитинового и красный – белкового. График «Эволюция пористости» предоставляет данные для анализа изменения пористости оболочки под действием озона и отображает по оси ординат долю пор (в условных единицах от 0 до 1).

Модель позволяет проводить количественную оценку изменений в структуре оболочки яйца и исследовать динамику процесса и может быть использована для оптимизации параметров дезинвазии и разработки новых методов обеззараживания.

Выводы. Разработаны математическая и компьютерная модели, комплексно описывающие процесс разрушения оболочки яйца аскариды под действием озона. Модели учитывают ключевые аспекты процесса: последовательное окисление липидного, хитинового и белкового слоёв оболочки; влияние температуры на скорость реакций (через уравнение Аррениуса); зависимость эффективности озонирования от влажности (с использованием эмпирической поправки), а также динамику изменения пористости оболочки в ходе окислительного процесса.

Проведённое моделирование позволило установить, что оптимальная концентрация озона

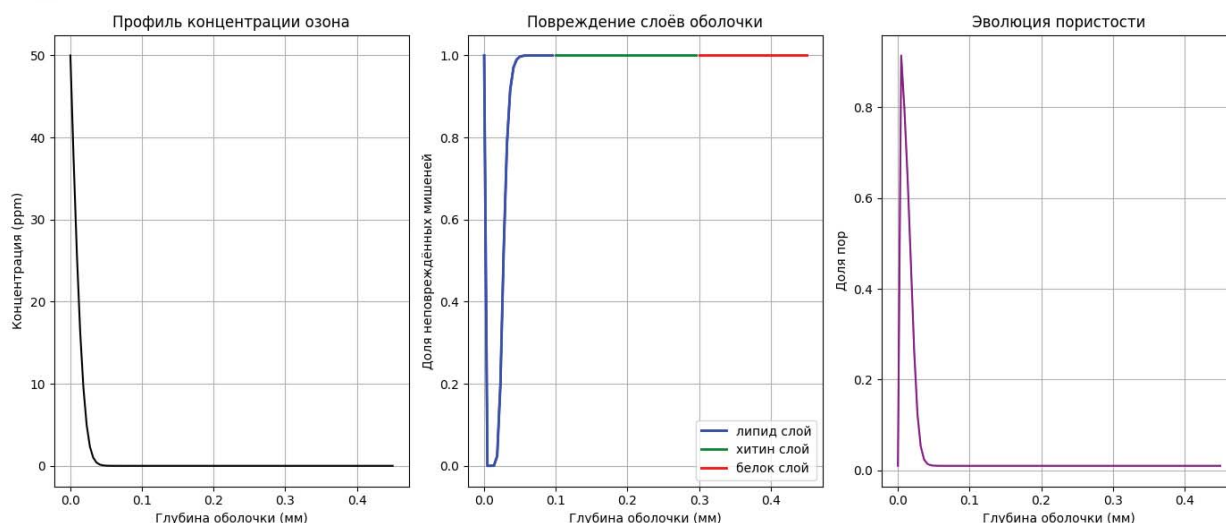


Рисунок 3 – Результат работы компьютерной модели в виде графиков «Профиль концентрации озона», «Повреждение слоёв оболочки» и «Эволюция пористости»

для эффективной дезинвазии яиц аскариды находится в диапазоне 50–150 ppm. Дальнейшее увеличение концентрации становится экономически нецелесообразным из-за снижения прироста эффективности и усиления побочных реакций. Важным практическим выводом является установленная зависимость: повышение температуры на 10–20°C снижает требуемую дозу озона в 1,5–2,0 раза благодаря ускорению окислительных процессов. Сравнительный анализ устойчивости слоёв оболочки показал, что наибольшей резистентностью к озону обладает хитиновый слой, тогда как белковый слой повреждается наиболее быстро.

Разработанный модельный комплекс позволяет с высокой точностью прогнозировать время, необходимое для гибели яйца аскариды, в зависимости от основных параметров озонирования: концентрации, времени экспозиции, температуры

и влажности. Компьютерная модель обеспечивает наглядную визуализацию процесса, включая распределение озона в оболочке, степень повреждения каждого слоя и динамику изменения пористости.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: учёт пространственной неоднородности распределения озона в обрабатываемом объёме; экспериментальная верификация модельных предсказаний на реальных биологических образцах, а также разработка оптимальных режимов озонирования для практического применения в системах дезинвазии воды, почвы и сельскохозяйственных объектов. Полученные результаты вносят значительный вклад в понимание механизмов окислительного повреждения яиц гельминтов и создают научную основу для разработки эффективных технологий обеззараживания с использованием озона.

Список источников

1. Долбин Д. А., Хайруллин Р. З. Устойчивость яиц гельминтов к неблагоприятным физическим, химическим и биологическим факторам окружающей среды (обзор литературы) // Российский паразитологический журнал. 2017. № 1. С. 14–19. EDN ZHFDAT.
2. Евстафьева В. А., Мельничук В. В., Тарасенко В. А. Морфометрическое строение яиц аскаридий кур // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. Г. Жицького. 2014. Т. 16, № 3-1 (60). С. 117–121. EDN VLQWFT.
3. Маханова Р. С. К вопросу изучения перекисного окисления липидов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2011. № 1 (29). С. 231–234. EDN NDRGNR.
4. Осиков М. В., Кайгородцева Н. В. Влияние системного применения озона на окислительную модификацию липидов и белков в толстой кишке при экспериментальном колите // Уральский медицинский журнал. 2022. Т. 21, № 5. С. 26–32. DOI 10.52420/2071-5943-2022-21-5-26-32. EDN REXYBU.
5. Меледина Т. В., Прохорчик И. П., Кузнецова Л. И. Биохимические процессы при производстве солода: учеб. пособие. Санкт-Петербург : Университет ИТМО, Институт холода и биотехнологий, 2013. 89 с. EDN ZUXZTH.
6. Бенько Е. М. Закономерности озонолитической делигнификации растительной биомассы // Физикохимия растительных полимеров: материалы IX международ. конф. (30 июня – 02 июля 2021 г.) / под ред. д-ра хим. наук, проф., засл. деятеля науки РФ К. Г. Боголицына; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова. Архангельск : САФУ. 317 с. ISBN 978-5-261-01247-4 URL: <https://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/ФизХимРастит-Полимер2021.pdf> (дата обращения: 21.05.2025).
7. Разумовский С. Д. Реакции озона с ароматическими и полисопряжёнными соединениями. URL: https://www.kge.msu.ru/ozone/archives/1rus_conf_pr/Plenary/P1-Razumovsky.pdf (дата обращения: 21.05.2025).
8. Осянин В. А., Климочкин Ю. Н. Окисление : практикум ; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2006. ISBN 5-7964-0720-1. URL: http://organic.samgtu.ru/sites/organic.samgtu.ru/files/oxydation_1.pdf (дата обращения: 22.05.2025).
9. Alcock L. J., Perkins M. V., Chalker J. M. Chemical methods for mapping cysteine oxidation. // Chemical Society Reviews. 2018. Vol. 47, Is. 1. P. 231–268. DOI 10.1039/C7CS00607A.
10. Макурина О. Н. Химия белка и ферментов. Самара : Изд-во «Универс групп», 2007. 99 с. ISBN 978-5-467-00133-3. EDN QKBUCZ.
11. Кузин А. В., Шмигель В. В. Измерение концентрации озона, производимого лабораторным озонатором // Цифровизация и технические инновации в АПК : сб. науч. тр. по материалам Нац. науч.-практ. конф. (Ярославль, 28 ноября 2024 г.). Ярославль : Изд-во ФГБОУ ВО «Ярославский ГАУ», 2025. С. 38–46. ISBN 978-5-98914-287-3. DOI 10.35694/YARCX.2025.28.11.24. EDN JMVYNR.
12. Письменко В. Т., Калюкова Е. Н. Кинетика химических реакций. Определение константы скорости и энергии активации реакций. Ульяновск : УлГТУ, 2002. 20 с.

References

1. Dolbin D. A., Khajrullin R. Z. Ustojchivost' yaic gel'mintov k neblagopriyatnym fizicheskim, himicheskim i biologicheskim faktoram okruzhayushchej sredy (obzor literatury) // Rossijskij parazitologicheskij zhurnal. 2017. № 1. S. 14–19. EDN ZHFDAT.
2. Evsta'eva V. A., Mel'nichuk V. V., Tarasenko V. A. Morfometricheskie stroenie yaic askaridij kur // Nauchnij visnik L'vivs'kogo nacional'nogo universitetu veterinarnoї medicini ta biotekhnologij imeni S. Z. G'zhe'kogo. 2014. T. 16, № 3-1 (60). S. 117–121. EDN VLQWFT.
3. Makhanova R. S. K voprosu izucheniya perekisnogo okisleniya lipidov // Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2011. № 1 (29). S. 231–234. EDN NDRGNR.
4. Osikov M. V., Kajgorodtseva N. V. Vliyanie sistemnogo primeneniya ozona na okislitel'nuyu modifikaciyu lipidov i belkov v tolstoj kishke pri eksperimental'nom kolite // Ural'skij medicinskij zhurnal. 2022. T. 21, № 5. S. 26–32. DOI 10.52420/2071-5943-2022-21-5-26-32. EDN REXYBU.
5. Meledina T. V., Prokhorchik I. P., Kuznetsova L. I. Biohimicheskie processy pri proizvodstve soloda: ucheb. posobie. Sankt-Peterburg : Universitet ITMO, Institut holoda i biotekhnologij, 2013. 89 s. EDN ZUXZTH.
6. Ben'ko E. M. Zakonomernosti ozonoliticheskoy delignifikacii rastitel'noj biomassy // Fizikohimiya rastitel'nyh polimerov: materialy IX mezhdunarod. konf. (30 iyunya – 02 iyulya 2021 g.) / pod red. d-ra him. nauk, prof., zasl. deyatelya nauki RF K. G. Bogolitsyna; Sev. (Arktich.) feder. un-t im. M. V. Lomonosova. Arhangel'sk : SAFU. 317 s. ISBN 978-5-261-01247-4 URL: <https://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/FizKHimRastitPolimer2021.pdf> (data obrashcheniya: 21.05.2025).
7. Razumovskij S. D. Reakcii ozona s aromatischeskimi i polisopryazhyonnymi soedineniyami. URL: https://www.kge.msu.ru/ozone/archives/1rus_conf_pr/Plenary/P1-Razumovsky.pdf (data obrashcheniya: 21.05.2025).
8. Osyanin V. A., Klimochkin Yu. N. Okislenie : praktikum ; Samar. gos. tekhn. un-t. Samara, 2006. ISBN 5-7964-0720-1. URL: http://organic.samgtu.ru/sites/organic.samgtu.ru/files/oxydation_1.pdf (data obrashcheniya: 22.05.2025).
9. Alcock L. J., Perkins M. V., Chalker J. M. Chemical methods for mapping cysteine oxidation. // Chemical Society Reviews. 2018. Vol. 47, Is. 1. P. 231–268. DOI 10.1039/C7CS00607A.
10. Makurina O. N. Himiya belka i fermentov. Samara : Izd-vo «Univers grupp», 2007. 99 s. ISBN 978-5-467-00133-3. EDN QKBUCZ.
11. Kuzin A. V., Shmigel' V. V. Izmerenie koncentracii ozona, proizvodimogo laboratornym ozonatorom // Cifrovizaciya i tekhnicheskie innovacii v APK : sb. nauch. tr. po materialam Nac. nauch.-prakt. konf. (Yaroslavl', 28 noyabrya 2024 g.). Yaroslavl' : Izd-vo FGBOU VO «Yaroslavskij GAU», 2025. S. 38–46. ISBN 978-5-98914-287-3. DOI 10.35694/YARCX.2025.28.11.24. EDN JMVYNR.
12. Pis'menko V. T., Kalyukova E. N. Kinetika himicheskikh reakcij. Opreделение konstanty skorosti i energii aktivacii reakcij. Ul'yanovsk : UIGTU, 2002. 20 s.

Сведения об авторах

Артем Викторович Кузин – аспирант кафедры электрификации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», spin-код: 4720-4520.

Владимир Викторович Шмигель – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрификации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», spin-код: 5673-4145.

Елена Владимировна Шешунова – кандидат технических наук, доцент, декан инженерного факультета, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», spin-код: 4860-1126.

Information about the authors

Artem V. Cuzin – Postgraduate student of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agrarian University", spin-code: 4720-4520.

Vladimir V. Shmigel – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agrarian University", spin-code: 5673-4145.

Elena V. Sheshunova – Candidate of Technical Sciences, Docent, Dean of the Faculty of Engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agrarian University", spin-code: 2190-8887.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.