

На правах рукописи



Цокур Екатерина Сергеевна

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПРОТОЧНОГО
ЭЛЕКТРОАКТИВАТОРА ВОДНЫХ РАСТВОРОВ
С ОЗОНИРОВАНИЕМ ДЛЯ ПРОФИЛАКТИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ УЛЬЕВ**

Специальность 4.3.2 – Электротехнологии, электрооборудование
и энергоснабжение агропромышленного комплекса

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» (ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ)

Научный руководитель	Оськин Сергей Владимирович доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Сторчевой Владимир Федорович доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Московский авиационный институт, кафедра «Теоретическая электротехника», профессор (г. Москва) Степанчук Геннадий Владимирович кандидат технических наук, доцент, Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, кафедра «Эксплуатация энергетического оборудования и электрических машин», доцент (г. Зерноград)
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный аграрный университет» (г. Ижевск)

Защита состоится «28» мая 2025 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 35.2.019.03 при ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13 (корпус факультета энергетики, ауд. 110).

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайтах: ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ – <http://kubsau.ru/> и ВАК – <https://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент
Самурганов Евгений Ерманекосович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из факторов существенно влияющим на производительность пасеки являются болезни пчел. Борьба с ними на протяжении многих десятилетий преимущественно ведется с помощью антибиотиков, которые при недобросовестном подходе к лечению могут попасть в мед и другие продукты пчеловодства. К тому же привыкание болезнетворных микроорганизмов к данным химическим препаратам ведет к усугублению ситуации. Поэтому на сегодняшний день актуален поиск и совершенствование новых экологически чистых способов профилактики и лечения заболеваний пчел. Одним из вариантов профилактических мероприятий на пасеке является дезинфекция пчелиных ульев. Часто она проводится химическими препаратами, что влияет на экологичность продуктов пчеловодства. Препараты, основанные на естественных компонентах, используются редко, т.к. они имеют слабую эффективность. Легко доступным для пчеловодов электротехнологическим методом получения экологически чистых дезинфицирующих растворов на пасеке является комбинация технологий получения анолита методом диафрагменного электролиза водных растворов и его барботация озоном. Имеющиеся на сегодняшний день электролизеры и электроактиваторы не позволяют быстро получить требуемое количество анолита повышенной эффективности. Получение активного дезинфицирующего раствора обычно связано с большими трудозатратами. Актуальна разработка проточных электроактиваторов, в которых процессы диафрагменного электролиза, активации и озонирования происходят одновременно. Это позволит повысить эффективность как самого анолита, так и, снизить трудоемкость его получения. Для этого необходимо провести дополнительные исследования и определить параметры и режимы работы таких установок.

Диссертационная работа выполнена по плану НИР Кубанского ГАУ ГР №121031700099-1 (2021-2025 г).

Степень разработанности темы. Большой вклад в развитие установок, облегчающих труд работников сельского хозяйства в том числе пчеловодов, внесли учёные ФГБОУ ВО РГАТУ имени П.А. Костычева (г. Рязань), Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ (г. Зерноград), ФГБОУ ВО Удмуртского

ГАУ (г. Ижевск), ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва), ФГБОУ ВО Ставропольского ГАУ (г. Ставрополь) и др. Применению электро-технологий в отдельных отраслях АПК посвящали свои работы Степанчук Г.В., Кондратьева Н.П., Юдаев И.В., Стародубцева Г.П., Лekomцев П.Л. и др. Вопросами озонирования и применения электролизеров в сельском хозяйстве, в том числе в пчеловодстве занимались: С.В. Оськин, В.Ф. Сторчевой, Д.А. Овсянников, С.А. Николаенко, С.П. Волошин, Д.С. Цокур и другие. Несмотря на глубину проводимых исследований и доказанную успешность применения озона с электроактивированными водными растворами в сельском хозяйстве, соответствующие установки требуют совершенствования, так при применении в пчеловодстве необходимо снижение энергозатрат, повышение эффективности дезинфицирующего растворов, уменьшения времени на получение активированных сред.

Научная гипотеза. Исследование процесса барботирования анолита озоном в проточном электроактиваторе позволит определить его параметры и режимы работы, что повысит эффективность дезинфицирующего раствора и сократит время на его получение при профилактических мероприятиях на пасеке, а также снизит риск попадания токсичных веществ в продукты пчеловодства.

Целью работы является обоснование параметров и режимов работы проточного электроактиватора водного раствора, с получением анолита насыщенного озоном для повышения эффективности дезинфекции пчелиных ульев и снижения количества применяемых химических препаратов при профилактических работах на пчелиной пасеке.

Задачи исследования.

1. Разработать конструкцию проточного электроактиватора, объединяющую процессы диафрагменного электролиза водного раствора с одновременным барботированием анолита озоном.

2. Разработать математические модели, описывающие основные процессы при работе проточного электроактиватора, для их реализации в программном комплексе Comsol Multiphysics, учитывающие расход водного раствора и его проводимость, плотность потока массы озона и его растворимость в зависимости от температуры.

3. Провести компьютерное моделирование процесса барботирования потока анолита озоном в электроактиваторе и получить рациональные параметры и режимы его работы.

4. Обосновать и реализовать способ насыщения потока анолита озоном.

5. Изготовить усовершенствованный проточный электроактиватор водного раствора для профилактической обработки ульев и провести экспериментальные исследования по сопоставлению опытных данных с результатами моделирования.

6. Провести исследования по влиянию озоносодержащего анолита на выживаемость плесневых грибов и установить необходимые параметры раствора.

7. Разработать алгоритм и принципиальную электрическую схему управления электроактиватором.

8. Обосновать экономическую эффективность внедрения разработанного проточного электроактиватора на пасеке.

Методология и методы исследования: конечных элементов с использованием современного ПО Comsol Multiphysics, законы физики, электротехники и гидравлики, методика проведения экспериментальных исследований.

Объект исследования – проточный электроактиватор воды для профилактической обработки ульев и плесневые грибы.

Предмет исследования – параметры и режимы работы проточного электроактиватора водного раствора, с получением анолита насыщенного озоном для профилактической обработки ульев; зависимость влияния водородного показателя озоносодержащего анолита и степени насыщения его озоном на выживаемость плесневых грибов.

Научная новизна работы:

- математические модели: барботирования потока анолита озоном; теплофизических процессов в электроактиваторе; обобщенная компьютерная модель для реализации в ПО Comsol Multiphysics;

- регрессионные зависимости влияния водородного показателя анолита насыщенного озоном и расхода воды через электроактиватор на выживаемость плесневых грибов;

- обоснованные параметры и режимы работы проточного электроактиватора для получения дезинфицирующего раствора анолита насыщенного озоном.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- математические модели барботирования потока анолита озонном и теплофизических процессов в электроактиваторе, позволившие получить обобщённую компьютерную модель для реализации в ПО Comsol Multiphysics, которые выявляют связи температуры анолита и концентрации растворенного в нем озона с параметрами и режимами работы электроактиватора;

- регрессионная модель влияния параметров процесса получения озоносодержащего анолита на выживаемость плесневых грибов, которая позволяет обосновать рациональные режимы работы проточного электроактиватора водного раствора;

- обоснованные параметры и режимы работы проточного электроактиватора для получения дезинфицирующего раствора анолита насыщенного озоном, позволяющие проектировать и изготавливать такое оборудование для проведения профилактических мероприятий на пасеке;

- разработанный и изготовленный проточный электроактиватор для получения дезинфицирующего раствора анолита насыщенного озоном, который повышает эффективность дезинфицирующего раствора, сокращает время на его получение и снижает риск попадания токсичных веществ в продукты пчеловодства.

Реализация результатов исследований. Результаты исследований внедрены в ООО «Предприятие по пчеловодству «Краснодарское» (Краснодарский край). Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе на факультете энергетики Кубанского ГАУ.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность результатов научного исследования подтверждается: методами компьютерного моделирования в ПО Comsol Multiphysics 6.1; обработкой экспериментальных данных с помощью ПО STATISTICA, использованием современной измерительной аппаратуры. Основные положения и выводы работы доложены и одобрены на ежегодных научно-практических конференциях преподавателей ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ по итогам НИР за 2019–2025 гг., а также на Междуна-

родной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы в международном трансфере инновационных технологий» (12 февраля 2018 г., Пермь); на 20-й Международной научной конференции «Engineering for rural development» (26–28 мая 2021 г. Елгава, Латвия); на Международной научно-практической конференции «Малая энергетика: проблемы, задачи и перспективы» (15–16 июня 2023 г., Краснодар).

На защиту выносятся:

- математические модели: барботирования потока анолита озонном, теплофизических процессов в электроактиваторе и их обобщенная компьютерная модель для реализации в ПО Comsol Multiphysics;
- регрессионная модель влияния параметров процесса получения озоносодержащего анолита на выживаемость плесневых грибов;
- обоснованные параметры и режимы работы проточного электроактиватора водных растворов с озонированием;
- результаты экспериментальных исследований и их сопоставление с данными моделирования.

Публикации результатов работы. Основное содержание работы отражено в 12 печатных работах, в том числе: 3 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК России, 3 патента и 6 статей – в других изданиях.

Объем и структура работы. Диссертация содержит введение, 3 главы, заключение, список литературы, включающий 150 наименований, приложения. Текст диссертации изложен на 130 страницах машинописного текста, включая 11 страниц приложений; содержит 54 рисунка и 15 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены актуальность исследований, цель работы, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ способов лечения наиболее распространенных болезней пчел, которые влияют на стабильность работы пасеки. Борьба с ними на протяжении многих десятилетий преимущественно ведется с помощью антибиотиков, которые при недобросовестном подходе к лечению зачастую попадают в мед и другие продукты пчеловодства. Поэтому на сегодняшний день ак-

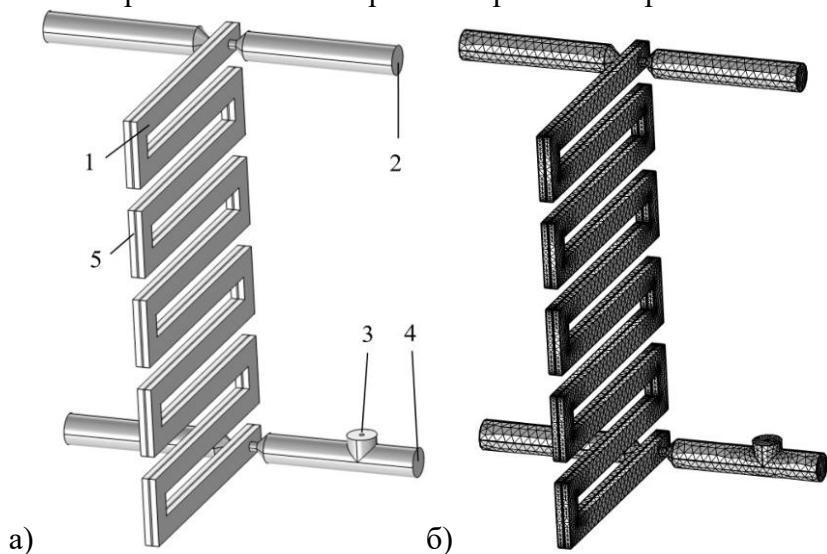
туален поиск и совершенствование новых экологически чистых способов профилактики и лечения заболеваний пчел. Одним из вариантов профилактических мероприятий на пасеке является дезинфекция пчелиных ульев. Как правило, ее проводят весной после зимнего периода, когда пчелиные ульи и рамки из-за обильного воздействия на них влаги подвергаются заражению плесневыми грибами, такими как *Penicillium*. Среди всех экологически чистых электротехнологических способов дезинфекции пчелиных жилищ наиболее перспективным является применение водных растворов анолита получаемых методом диафрагменного электролиза. Известны работы Бахира В.М., в которых анолит используется в качестве дезинфицирующего и лечебного средства на пасеке. Но для его получения в исходную воду добавляется соль, что может вызвать солевой токсикоз у пчел, а также избыточное содержание хлорсодержащих веществ в растворе. Другим подходом является получение анолита из водопроводной воды без добавления солей. Этой теме были посвящены работы Оськина С.В., Оськина А.С., Курченко Н.Ю., Цокур Д.С. и др. Усилить дезинфицирующий эффект анолита можно путем его насыщения озоном. Разработка непроточного электроактиватора, совмещающего технологии диафрагменного электролиза водных растворов и их озонирование проводилась Волошиным С.П. в Кубанском ГАУ. Однако, до сих пор отсутствует электроактиватор позволяющий получать озоносодержащий анолит в потоке жидкости, проходящей через анодную камеру. Влияние таких растворов на плесневые грибы рода *Penicillium*, которые согласно Сердюченко И.В. являются доминирующими в пчелином улье с марта по июль, мало изучено.

Сформулирована цель работы и задачи исследования.

Во второй главе представлено математическое и компьютерное моделирование процесса барботирования потока анолита озоном в проточном электроактиваторе. На рисунке 1 показана разработанная геометрическая модель электроактиватора, созданная в ПО Comsol Multiphysics на основании предварительных исследований и предыдущего литературного анализа. Она состоит из анодной и катодной камер, которые разделены пористой диафрагмой и имеют зигзагообразную форму для увеличения пути газа и раствора в установке. Подача исходной воды в анодную камеру осуществляется через тройник, выполняющий роль смесителя воды с озоном. На этом

же рисунке показан вид расчетной сетки для проведения компьютерного моделирования методом конечных элементов.

Рассматриваемая задача может быть описана двумя взаимосвязанными моделями: первая – барботирования анолита озонем, которая включает в себя течение газа и водного раствора в электроактиваторе, массообмен пузырьков озона с анолитом и перенос массы растворенного газа в нем; вторая – теплофизических процессов с протеканием электрического тока через электроактиватор.



1 – зигзагообразный канал анодной камеры, 2 – отверстие для выхода анолита, 3 – отверстие для подачи озонозудушной смеси, 4 – отверстие для подачи воды, 5 – диафрагма

Рисунок 1 – Изображение геометрической модели электроактиватора для профилактической обработки ульев (а) и построенная расчетная сетка (б)

В соответствии с двухплеченной теорией массообмен между пузырьками газа и анолитом можно описать выражением:

$$\frac{\partial \varphi_g \rho_g}{\partial t} + \nabla(\varphi_g \rho_g u_g) = -m_{gl} \quad (1)$$

где φ_g – объемная доля, занимаемая газом в анодной камере, м³/м³; ρ_g – плотность газа, кг/м³; u_g – скорость газа в жидкости (в воде), м/с; m_{gl} – скорость массопередачи газа в жидкость $m_{gl} = k(c_p - c_{O_3})Ma$,

кг/(м³·с); k – коэффициент массопередачи, м/с; c_p – равновесная концентрация озона в жидкости (в воде), моль/м³; c_{O_3} – концентрация растворенного озона в жидкости (в воде), моль/м³; M – молярная масса озона, равная 47,998 г/моль; a – площадь поверхности раздела фаз на единицу объема, м²/м³.

Определено, что для описания коэффициента массопередачи k и связанного с ним коэффициента диффузии озона D_{O_3} в воде наиболее подходящими являются известные формулы:

$$k = 1,13 \sqrt{\frac{D_{O_3}}{\frac{d_b}{u_g}}} \quad \text{и} \quad D_{O_3} = \frac{7,4 \cdot 10^{-8} \sqrt{2,6 \cdot MT}}{\mu_l \cdot (0,285 \cdot V^{1,048})^{0,6}} \quad (2)$$

где d_b – диаметр газовых пузырьков, принят равным 0,003 м; V – критический объем озона, равный 89 см³/моль; μ_l – динамическая вязкость жидкости, Па·с; T – температура, К.

На основании экспериментальных данных определена зависимость равновесной концентрации озона в анолите c_p от температуры:

$$c_p = -1,76 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 + 248,5 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 - 9240,6 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 97170,4 \cdot 10^{-7} \cdot T + 0,82 \quad (3)$$

Движение потока газа и раствора в электроактиваторе было принято ламинарным, что позволило описать поля течения жидкости и газа уравнениями движения (4) и неразрывности (5):

$$\varphi_l \rho_l \frac{\partial u_l}{\partial t} + \varphi_l \rho_l (u_l \cdot \nabla) u_l = \nabla \left(-p + \varphi_l \mu_l \left(\nabla u_l + (\nabla u_l)^T - \frac{2}{3} (\nabla u_l) \vec{I} \right) \right) + \varphi_l \rho_l g \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varphi_l \rho_l + \varphi_g \rho_g) + \nabla (\varphi_l \rho_l u_l + \varphi_g \rho_g u_g) = 0 \quad (5)$$

где p – давление, Па; φ_l – объемная доля, занимаемая жидкостью, м³/м³; $\vec{I}$ – единичный вектор; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ_l – плотность жидкости, кг/м³; u_l – скорость жидкости, м/с.

Принято допущение, что пузырьки газа могут расширяться или сжиматься, но не могут полностью исчезать, сливаться или разделяться, т.е. количество пузырьков газа n всегда сохраняется неизменным:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot n(u_l + u_{slip}) = 0 \quad (6)$$

где n – количество пузырьков озона в объеме φ_g , $1/\text{м}^3$; u_{slip} – скорость, направленная по касательной к стенкам геометрической модели, м/с .

Для определения u_{slip} использовался баланс между силой вязкого сопротивления f_D и градиентом давления p : $f_D = \varphi_l \nabla p$, где f_D :

$$f_D = -C_d \frac{3}{4} \frac{\rho_l}{d_b} |u_{slip}| u_{slip} \quad (7)$$

где C_d – коэффициент вязкого сопротивления, безразмерная величина, определяемая по формуле Адамара-Рыбчинского:

$$C_d = \frac{16}{d_b \rho_l |u_{slip}| \mu_l} \quad (8)$$

Перенос массы растворенного озона в воде посредством конвекции и диффузии описывается уравнением:

$$\frac{\partial c_{O_3}}{\partial t} + \nabla J_{O_3} + u_l \nabla c_{O_3} = R_{O_3} \quad (9)$$

где J_{O_3} – плотность потока озона, вызванного диффузией, определяется уравнением Фика: $J_{O_3} = -D_{O_3} \nabla c_{O_3}$, $\text{моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; R_{O_3} – скорость реакции с участием озона равная отношению m_{gl} к его молярной массе M , $\text{моль}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$.

Уравнения (1)-(9) описывают процесс барботирования потока анолита озоном и в общем виде математическая модель выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi_g \rho_g}{\partial t} + \nabla(\varphi_g \rho_g u_g) = -m_{gl}; & m_{gl} = f(k, T, u_g, c_{O_3}, \mu_l, a); \\ \varphi_l \rho_l \frac{\partial u_l}{\partial t} + \varphi_l \rho_l (u_l \cdot \nabla) u_l = \nabla \left(-p + \varphi_l \mu_l \left(\nabla u_l + (\nabla u_l)^T - \frac{2}{3} (\nabla u_l) \vec{I} \right) \right) + \varphi_l \rho_l g; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\varphi_l \rho_l + \varphi_g \rho_g) + \nabla(\varphi_l \rho_l u_l + \varphi_g \rho_g u_g) = 0; \\ \frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot n(u_l + u_{slip}) = 0; & u_{slip} = f(\rho_l, d_b, \mu_l, \varphi_l, p); \\ \frac{\partial c_{O_3}}{\partial t} + \nabla J_{O_3} + u_l \nabla c_{O_3} = R_{O_3}. \end{cases} \quad (10)$$

Для описания теплофизических процессов в электроактиваторе использовалось уравнение теплового баланса:

$$\rho_l C_l \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q_l + \rho_l C_l u_l \nabla T = \Theta \quad (11)$$

где C_l – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К); q_l – тепловой поток, обусловленный теплопроводностью среды, $q_l = -k_l \nabla T$ Вт/м²; k_l – коэффициент теплопроводности жидкости (воды), Вт/(м·К); Θ – тепловыделение, обоснованное протеканием электрического тока через воду в соответствии с законом Джоуля-Ленца, Вт/м³: $\Theta = -i_l \nabla \phi_l$; i_l – плотность тока, $i_l = -\sigma_l \nabla \phi_l$, А/м²; ϕ_l – падение напряжения на анодной и катодной камерах и на диафрагме, В; σ_l – удельная проводимость среды, С/м.

Установлено, что характер изменения проводимости жидкости (воды) во время электролиза остается постоянным и зависит лишь от начального значения σ_0 , что позволило описать изменение проводимости анолита σ_A , католита σ_K и диафрагмы σ_D следующими эмпирическими зависимостями:

$$\begin{cases} pH_A = (pH_{нач} - 7,5) + (6,32 + 0,025Q_A - 0,1735I + 0,0023Q_A I - 0,00017Q_A^2 - 0,0068I^2); \\ \sigma_A = 0,57 pH_A^6 - 23 pH_A^5 + 376,6 pH_A^4 - 3211 pH_A^3 + 15039 pH_A^2 - \\ - 36584 pH_A + 36306 + (\sigma_0 - 700); \\ \sigma_K = 1066,5 + (\sigma_0 - 700); \\ \sigma_D = (\sigma_A + \sigma_K) / 2. \end{cases} \quad (12)$$

где $pH_{нач}$ – значение рН исходной воды; I – сила тока через электролизер, А; Q_A – производительность электролизера по анолиту, л/ч.

Уравнение (11) и система уравнений (12) описывают теплофизические процессы в проточном электроактиваторе и в общем виде математическая модель выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \rho_l C_l \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q_l + \rho_l C_l u_l \nabla T = \sigma_l (\nabla \phi)^2; q_l = -k_l \nabla T; \\ \sigma_A = f(pH_{нач}, Q_A, I, \sigma_0); \\ \sigma_K = 1066,5 + (\sigma_0 - 700); \\ \sigma_D = (\sigma_A + \sigma_K) / 2. \end{cases} \quad (13)$$

Для получения обобщенной компьютерной математической модели основных процессов при работе проточного электроактиватора в ПО Comsol Multiphysics были задействованы следующие физические интерфейсы. Для моделирования поля скоростей жидкой и газовой фаз был использован интерфейс – Bubbly Flow, в котором проводилось решение уравнений (1)-(8). Процесс массопереноса рас-

творенного озона в воде согласно (9) рассчитывался с помощью интерфейса Transport of Diluted Species. Для определения тепловых полей использовался интерфейс Heat Transfer in Fluids в котором решалось уравнение (11). Для расчета падения напряжения на диафрагме, анодной и катодной камерах был задействован интерфейс Primary Current Distribution – уравнение (12). Помимо этого, были заданы соответствующие граничные условия (ГУ) на входе и выходе анолита из установки, а также на границе входа озона в электролизер. В общем виде обобщенная компьютерная математическая модель основных процессов в электроактиваторе выглядела следующим образом:

$$\begin{cases}
 \varphi_l \rho_l \frac{\partial u_l}{\partial t} + \varphi_l \rho_l (u_l \cdot \nabla) u_l = \\
 = \nabla \left(-p + \varphi_l \mu_l \left(\nabla u_l + (\nabla u_l)^T - \frac{2}{3} (\nabla u_l) I \right) \right) + \varphi_l \rho_l g; \text{ ур - ие движения} \\
 \frac{\partial}{\partial t} (\varphi_l \rho_l + \varphi_g \rho_g) + \nabla (\varphi_l \rho_l u_l + \varphi_g \rho_g u_g) = 0; \text{ ур - ие неразрывности} \\
 \frac{\partial \varphi_g \rho_g}{\partial t} + \nabla (\varphi_g \rho_g u_g) = -m_{gl}; \text{ ур - ие массопередачи газа в воду} \\
 m_{gl} = f(k, T, u_g, c_{O_3}, \mu_l, a); \text{ зави - ть массопередачи от вязкости, скорости воды и др.} \\
 \frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot n(u_l + u_{slip}) = 0; \text{ условие сохр - ия кол - ва пузырьков в объеме} \\
 \frac{\partial c_{O_3}}{\partial t} + \nabla J_{O_3} + u_l \nabla c_{O_3} = R_{O_3}; \text{ ур - ие переноса озона в анолите} \\
 u_{l_in} = \frac{4Q}{2\pi d^2}; \text{ ГУ на входе воды в установку} \\
 n \left(-pI + \varphi_l \mu_l \left(\nabla u_l + (\nabla u_l)^T - \frac{2}{3} (\nabla u_l) I \right) \right) = -p_{out} n; \text{ ГУ на выходе анолита из установки} \\
 n \cdot u_{l_wall} = 0; n \cdot J_{O_3} = 0; -n \cdot N_{wall} = A_{O_3} \cdot S; \text{ ГУ на входе озона в установку и на ее стенках} \\
 \rho_l C_l \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q_l + \rho_l C_l u_l \nabla T = \sigma_l (\nabla \phi)^2; \text{ закон сохранения энергии} \\
 pH_A = (pH_{нач} - 7,5) + (6,32 + 0,025Q_A - 0,1735I + 0,0023Q_A I - 0,00017Q_A^2 - 0,0068I^2); \text{ определение pH анолита} \\
 \sigma_A = 0,57188 pH_A^6 - 22,99985 pH_A^5 + 376,58764 pH_A^4 - 3211,32514 pH_A^3 + \\
 + 15039,25025 pH_A^2 - 36584,1109815039,25025 pH_A + 36306,47146 + \\
 + (\sigma_0 - 700); \text{ определение проводимости анолита} \\
 \sigma_K = 1066,5 + (\sigma_0 - 700); \text{ определение проводимости католита} \\
 \sigma_d = (\sigma_A + \sigma_K) / 2; \text{ определение проводимости диафрагмы}
 \end{cases} \quad (14)$$

где p_{out} – давление на выходе из установки, Па; u_{l_wall} – скорость, направленная к стенке по нормали n , м/с; N_{wall} – плотность потока массы озона, (г·м²)/ч; A_{O_3} – производительность озонатора, принята

равной 2 г/ч; S – площадь сечения через которое подается озон, м^2 ; v_{l_in} – скорость жидкости (воды) на входе в электроактиватор, м/с ; Q – расход жидкости (воды) через электроактиватор, л/мин ; d – диаметр входного отверстия для подачи исходной воды в камеры электроактиватора, 0,019 м.

В результате компьютерного моделирования были получены поля распределения концентраций озона в анолите и температур получаемого раствора (рис. 2 и 3).

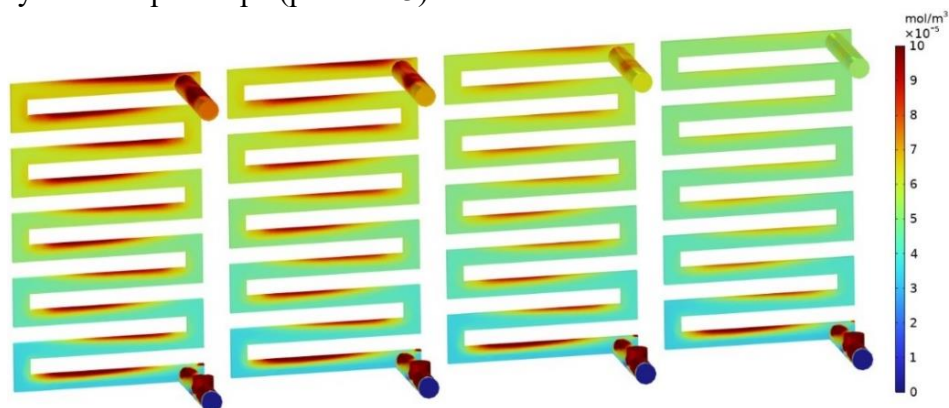


Рисунок 2 – Изображение полей концентраций озона SO_3 , растворенного в анодной камере при расходе $Q = 1,5$ л/мин через 2 минуты барботажа при токах (слева на право): 5 А, 10 А, 15 А и 20 А.

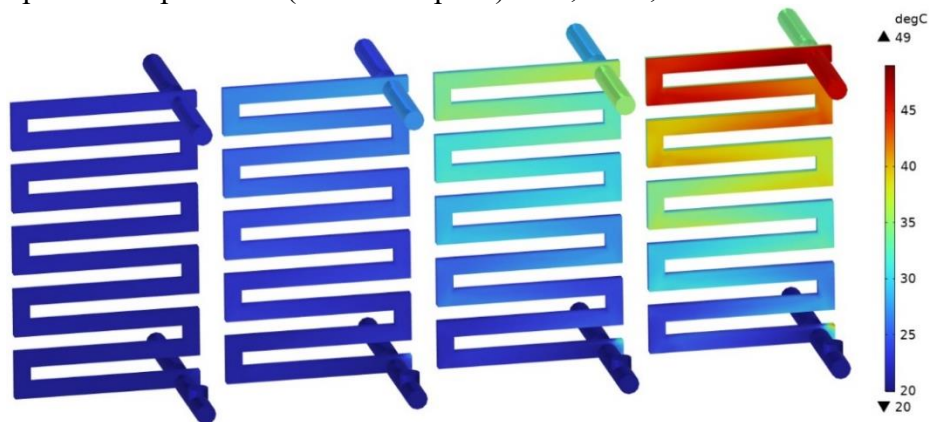


Рисунок 3 – Изображения температурных полей в установке при $Q = 1,5$ л/мин через 2 минуты барботажа при токах (слева на право): 5 А, 10 А, 15 А и 20 А

Ток при моделировании изменялся в диапазоне от 5 А до 20 А, что соответствовало рассматриваемому диапазону pH анолита от 3,8 до 7,4. Расход Q через электроактиватор варьировали от 1 л/мин до 2,5 л/мин.

Увеличение тока с 5 А до 20 А при $Q = 1,5$ л/мин приводит к нагреву озоносодержащего анолита до $46,6^{\circ}\text{C}$ и к снижению концентрации растворенного в нем озона в 1,5 раза. Увеличение расхода до 2,5 л/мин приводит к снижению температуры раствора до $36,4^{\circ}\text{C}$, но не ведет к увеличению концентрации озона вследствие уменьшения времени пребывания пузырей газа в анолите (табл.1).

Таблица 1 – Зависимости влияния тока и расхода Q на концентрацию растворенного в анолите озона CO_3 и температуру T раствора

Расход Q , л/мин ↓	Концентрация растворенного в анолите озона на выходе из установки, моль/м ³				Температура анолита на выходе из установки, °C			
	Токи, А → 5	10	15	20	5	10	15	20
1	$92 \cdot 10^{-6}$	$79 \cdot 10^{-6}$	$62 \cdot 10^{-6}$	$48 \cdot 10^{-6}$	22,5	29,5	42	54
1,5	$77,8 \cdot 10^{-6}$	$71,8 \cdot 10^{-6}$	$63 \cdot 10^{-6}$	$53 \cdot 10^{-6}$	21,7	26,7	35	46,6
2	$65,2 \cdot 10^{-6}$	$61,6 \cdot 10^{-6}$	$56 \cdot 10^{-6}$	$49,6 \cdot 10^{-6}$	21,3	25,1	31,4	40,2
2,5	$51,3 \cdot 10^{-6}$	$49 \cdot 10^{-6}$	$45,3 \cdot 10^{-6}$	$41 \cdot 10^{-6}$	21	24,1	29,2	36,4

Диапазон токов от 15 А до 20 А является наиболее рациональным, т.к. получаем растворы анолита с pH от 5,3 до 3,8, которые соответствуют наибольшей концентрации хлорсодержащих веществ. Наиболее рациональным расходом воды является $Q = 1,5$ л/мин, при котором достигаются высокие значения концентраций озона.

Время выхода на установившийся режим по концентрации озона в анолите при расходе $Q = 1,5$ л/мин в независимости от силы тока составляет 50-60 секунд (рис. 4).

Получены вольт-амперные характеристики (ВАХ) электроактиватора при электролизе с разными значениями расхода воды Q через него (рис. 5).

Определено, что для получения одного и того же pH при расходе $Q = 2,5$ л/мин требуется в 2 раза больше мощности, чем при $Q = 1,5$ л/мин, что позволяет рекомендовать последний также и с точки зрения уменьшения энергетических затрат при проведении работ на пасеке (таблица 2).

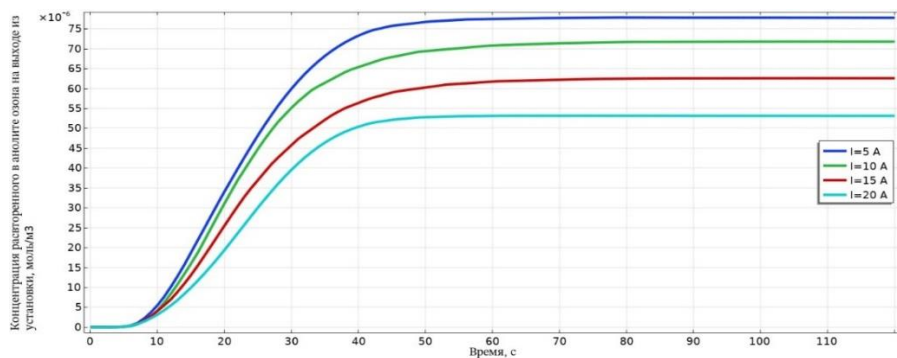


Рисунок 4 – Графики изменения во времени концентраций растворенного в анолите озона на выходе из установки при разных значениях тока и при производительности по анолиту $Q = 1,5$ л/мин

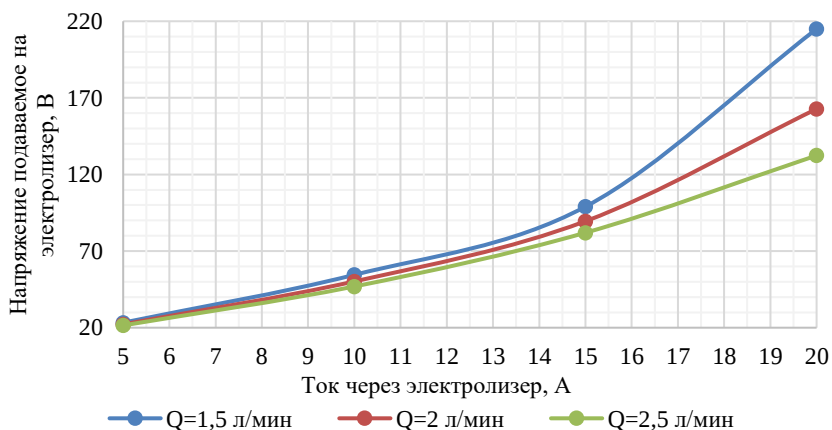


Рисунок 5 – ВАХ электролизера при разных значениях расхода воды Q через него

Таблица 2 – Мощность установки и pH получаемых растворов при различных значениях тока I и расхода воды Q

$I, \text{A} \rightarrow$	5	10	15	20
$Q, \text{л/мин} \downarrow$	$P, \text{Вт} / \text{pH}_\text{A}$			
1,5	116,5 / 7,4	545 / 6,5	1485 / 5,3	4300 / 3,8
2	111 / 7,7	502 / 7	1342,5 / 5,9	3256 / 4,6
2,5	107,5 / 7,9	469 / 7,3	1230 / 6,5	2648 / 5,3

Обоснован способ насыщения потока анолита озонном в разработанной конструкции электроактиватора в виде замены смесителя на трубку Вентури (рис. 6), что позволило при расходе $Q = 1,5$ л/мин увеличить концентрацию озона в анолите на выходе из установки в 2 раза по сравнению с результатами представленными в таблице 1. Время выхода на установившийся режим по растворенному озону в анолите при этом сократилось до 30-40 секунд.

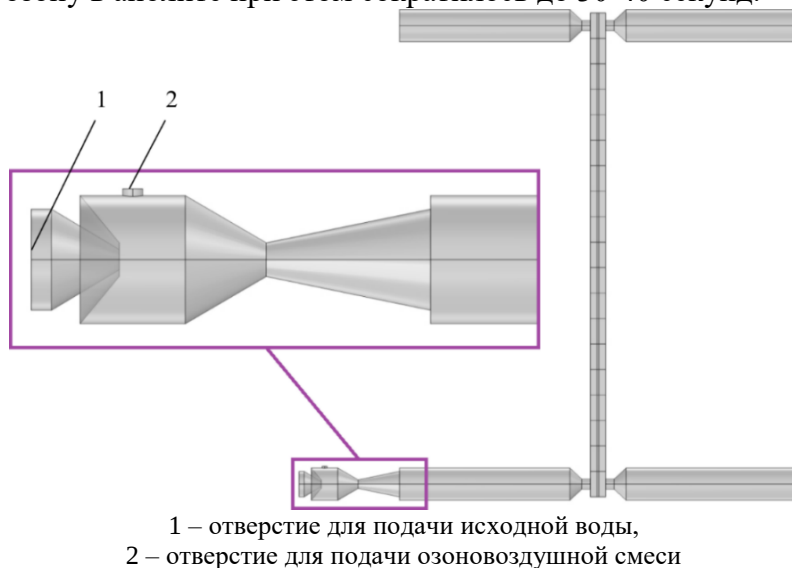
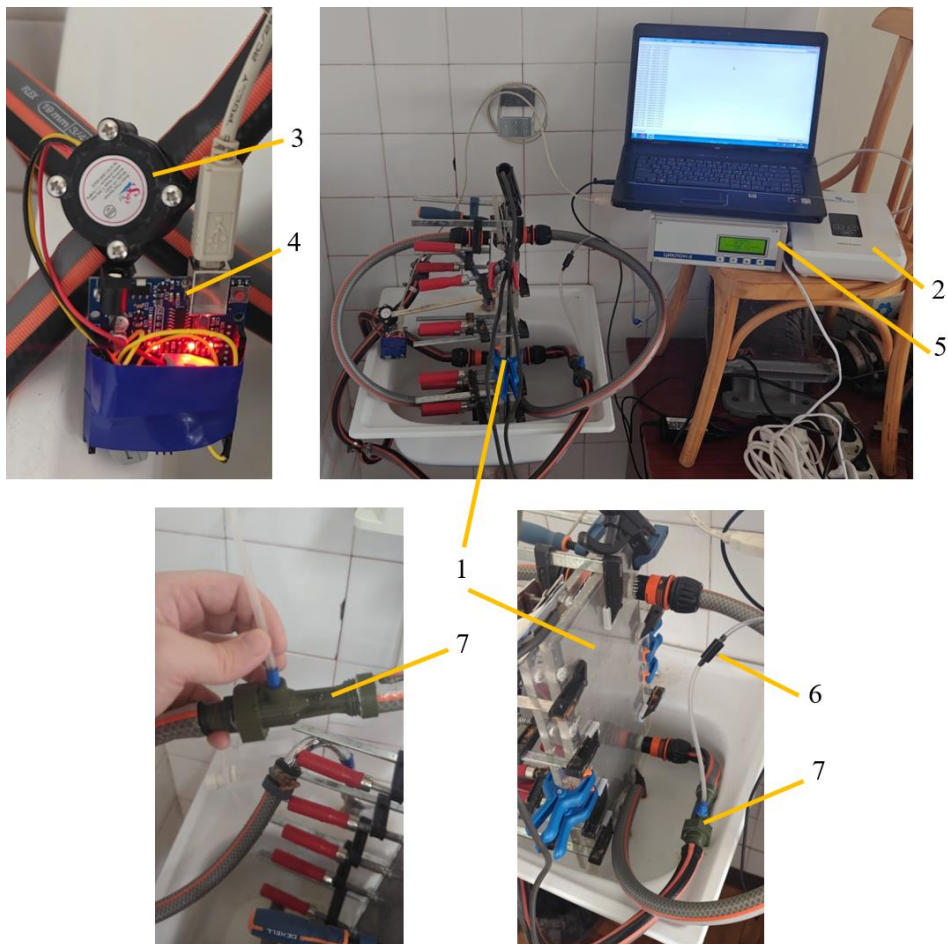


Рисунок 6 – Изображение измененной геометрической модели электроактиватора

В третьей главе проведены экспериментальные исследования по подтверждения теоретических положений. Для этого был изготовлен проточный электроактиватор водных с озонированием включающий: проточный диафрагменный электролизер воды и подключенную к входу его анодной камеры трубку Вентури для подачи озона. В состав лабораторной установки также входил озонатор и необходимые измерительные приборы (рис. 7).

Проведенные экспериментальные исследования на установке показали, что при расходе воды через электроактиватор 1,5 л/мин концентрация растворенного озона в анолите на выходе из анодной камеры не превышает 0,01 мг/л, что подтверждает результаты математического моделирования.



1 – диафрагменный электролизер воды, 2 – озонатор, 3 – датчик расхода воды, 3 – микроконтроллерная плата Arduino, 5 – измеритель концентрации озона Циклон-5, 6 – обратный клапан, 7 – трубка Вентури

Рисунок 7 – Фотографии лабораторной установки

Проведенные экспериментальные исследования по сопоставлению опытных данных с результатами моделирования показали следующее: относительная ошибка по температуре озоносодержащего анолита не более 6,7 %, по напряжению, подаваемому на электроды не более 9,1 %; проведенное статистическое сравнение теоретических и экспериментальных данных по U-критерию Манна-Уитни

подтвердило отсутствию статистических различий между ними (рис . 8).

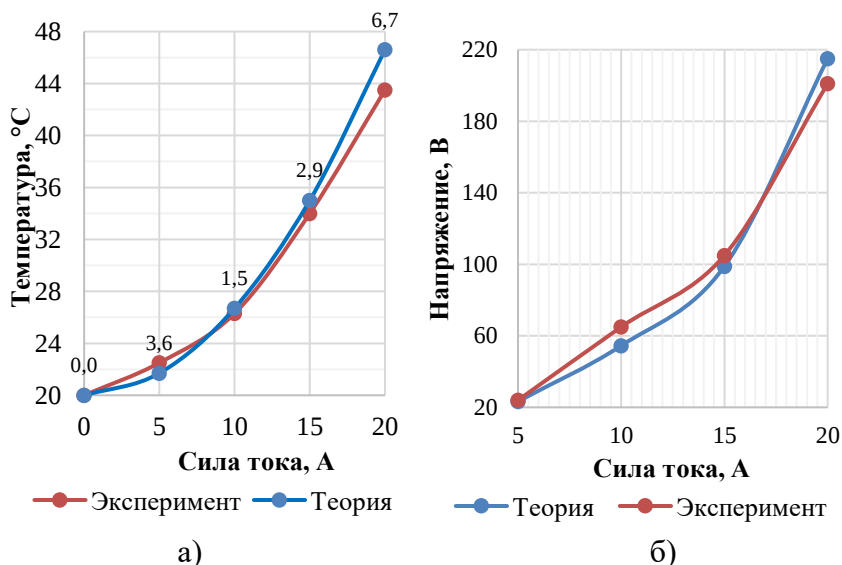


Рисунок 8 – Графики сравнения теоретических и экспериментальных данных температуры анолита на выходе из электроактиватора при $Q = 1,5$ л/мин (а) и ВАХ при том же Q (б)

Проведены экспериментальные исследования влияния параметров полученного озоносодержащего анолита на выживаемость плесневого гриба *Penicillium* (табл. 3).

Таблица 3 – Результаты влияния рН озоносодержащего анолита и расхода воды через электроактиватор на выживаемость *Penicillium*

№	рН x_1	Расход воды x_2 , л/мин	Число <i>Penicillium</i> после воздействия, КОЕ/см ³	Выживаемость <i>Penicillium</i> , y_1 , %
		Контроль	$3736 \cdot 10^9$	100
1	6	1,5	$2056 \cdot 10^9$	51,4
2	6	2	$2080 \cdot 10^9$	55
3	6	2,5	$1920 \cdot 10^9$	55,7
4	4	1,5	$1488 \cdot 10^9$	39,8
5	4	2	$2272 \cdot 10^9$	52,7
6	4	2,5	$1552 \cdot 10^9$	61,5
7	2,7	1,5	$2776 \cdot 10^9$	60
8	2,7	2	$2568 \cdot 10^9$	68,7
9	2,7	2,5	$2248 \cdot 10^9$	74,3

В результате исследования получено регрессионное уравнение:
 $y_1 = 64,7391 - 33,7959 \cdot x_1 + 55,2216 \cdot x_2 + 4,2164x_1^2 - 3,5090 \cdot x_1 \cdot x_2 - 6,7333 \cdot x_2^2$ (15)

Определено, что наименьшая выживаемость тест-объекта – 40 % достигается при pH в диапазоне от 4,6 до 5 и расходе воды через электролизер 1,5 л/мин (рис. 9).

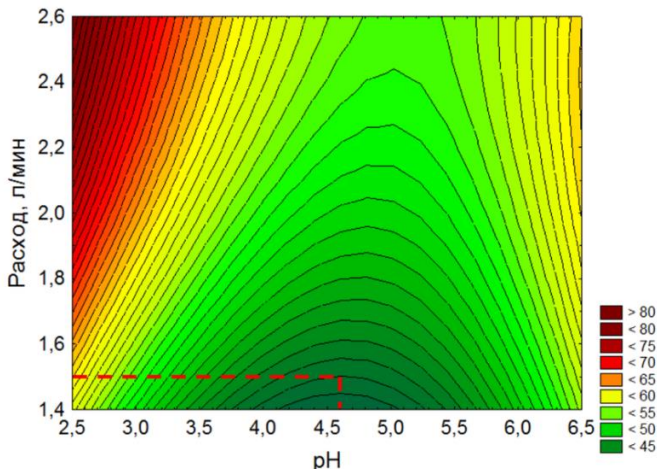


Рисунок 9 – Изображение поверхности, полученной по регрессионной модели (15) описывающей влияние pH озоносодержащего анолита – x_1 и расхода воды через электроактиватор – x_2 на выживаемость плесневого гриба *Penicillium* – y_1

Регрессионный анализ модели показал, ее высокое качество – скорректированный коэффициент детерминации равен 0,86, а также ее адекватность – табличное значение критерия Фишера при $p = 0,05$ $F_{табл} = 9,01$, что меньше расчетного $F_{расч} = 10,91$. Также проведено исследование выживаемости *Penicillium* при использовании анолита не насыщенного озоном, которая составила – 80 %, что говорит о снижении активности раствора в 2 раза по сравнению с насыщенным раствором.

На основании полученных теоретических и экспериментальных результатов получен алгоритм работы электроактиватора (рис. 10) в соответствии, с которым разработана принципиальная электрическая схема его управления на базе микроконтроллера PIC16F1827 (рис. 11).

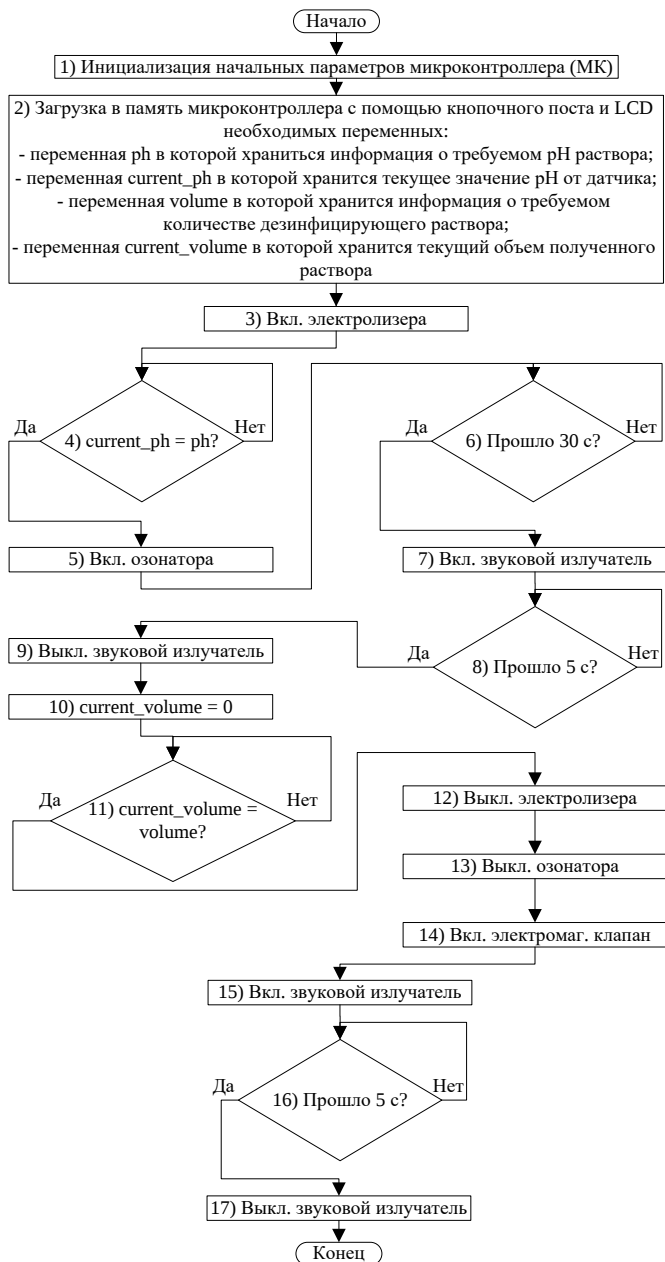


Рисунок 10 – Блок-схема алгоритма управления электроактиватором

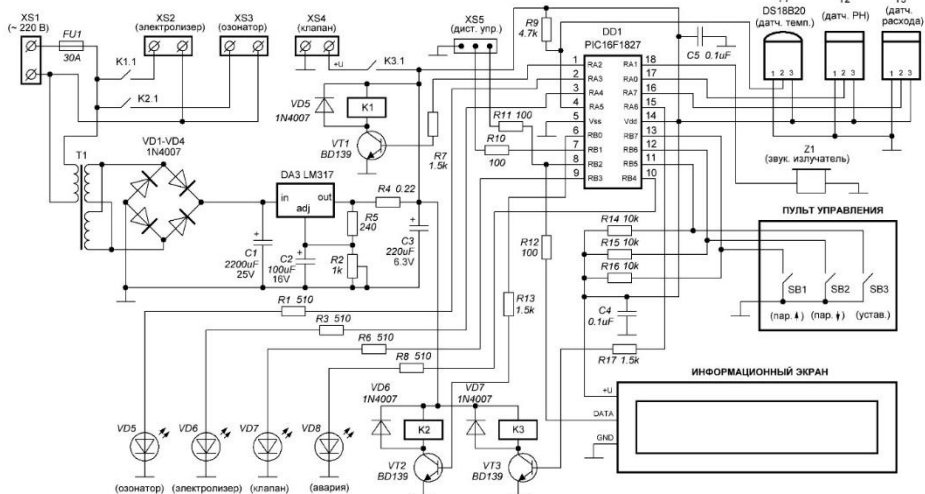


Рисунок 11 – Принципиальная электрическая схема управления проточным электроактиватором воды для профилактических обработок пчелиных ульев

Полевые испытания разработанного электроактиватора проводили в ООО «Предприятие по пчеловодству «Краснодарское». Для испытаний было отобрано 10 пчелиных ульев с максимально близкими по силе пчелиными семьями: 5 контрольных, и 5 опытных. Контрольные улья после зимовки были обработаны перекисью водорода и муравьиной кислотой. Также в сезон проводилась их обработка химическими препаратами типа «Оксибатоцид». Опытные улья после зимовки были обработаны озоносодержащим анолитом с $pH = 5$. В сезон проводилось 4 профилактических обработки ульев и соторамок. При этом часть получаемого католита с $pH=11$ разбавляли водопроводной водой в пропорции 1:3 и использовали для поения пчел в опытных ульях. Проведенные полевые испытания проточного электроактиватора для профилактической обработки ульев показали уменьшение заболеваемости пчел в опытных ульях, что в свою очередь позволило сократить количество используемых антибиотиков и повысить качество меда; снизить заклещенность пчел; повысить медопроизводство опытных ульев по сравнению с контрольными на 12 %.

Экономическая эффективность внедрения разработанного проточного электроактиватора воды для пасеки в 50 ульев рассчитывалась на основе данных полученных при полевом эксперименте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Разработана конструкция проточного электроактиватора, объединяющая процессы диафрагменного электролиза водного раствора с одновременным барботированием анолита озоном.

2. Разработаны математические модели: барботирования потока анолита озоном и теплофизических процессов в электроактиваторе. На их базе в ПО Comsol Multiphysics получена обобщенная математическая компьютерная модель основных процессов в электроактиваторе дополнительно включающая в себя: начальные и граничные условия, в которых заданы значения исследуемых параметров на входных и выходных границах исследуемой геометрической области; расход водного раствора через установку и его проводимость, плотность потока массы озона и его растворимость от температуры анолита.

3. В результате компьютерного моделирования процесса барботирования потока анолита озоном и основных процессов в проточном электроактиваторе установлено, что рациональными параметрами установки в установившемся режиме являются: расход водного раствора 1,5 л/мин, диапазон токов от 15 А до 20 А, уровень рН при этом составит соответственно от 5,3 до 3,8, при производительности озонатора 2 г/ч. Время выхода на установившийся режим составляет 50-60 секунд.

4. Для большего насыщения потока анолита озоном в разработанной конструкции электроактиватора был обоснован и реализован способ заключающейся в замене смесителя на трубку Вентури, что позволило при расходе 1,5 л/мин увеличить концентрацию озона в анолите на выходе из установки в 2 раза. Время выхода на установившийся режим по растворенному озону в анолите при этом сократилось до 30-40 секунд.

5. Изготовлен проточный электроактиватор водного раствора для профилактической обработки ульев включающий: проточный диафрагменный электролизер воды и подключенную к входу его

анодной камеры трубки Вентури с подачей озона от озонатора. Сопоставление опытных данных с результатами моделирования показали следующее: относительная ошибка по температуре озоносо-держащего анолита составила не более 6,7 %, по напряжению, пода-ваемому на электроды не более 9,1 %; проведенное статистическое сравнение теоретических и экспериментальных данных по U-критерию Манна-Уитни подтвердило отсутствию статистических различий между ними.

6. Проведены экспериментальные исследования влияния пара-метров полученного озоносодержащего анолита при производи-тельности озонатора 2 г/ч на выживаемость плесневого гриба *Penicillium* sp. в результате которых получено регрессионное уравнение и установлено следующее: наименьшая выживаемость тест-объекта – 40 % достигается при pH в диапазоне от 4,6 до 5 и расходе воды че-рез электролизер 1,5 л/мин. Регрессионный анализ модели показал, ее высокое качество – скорректированный коэффициент детермина-ции 0,86, а также ее высокую адекватность по критерию Фишера. Также проведено исследование выживаемости *Penicillium* sp. при использовании анолита не насыщенного озоном, которая составила – 80 %, что говорит о снижении активности раствора в 2 раза по срав-нению с насыщенным раствором.

7. На основании полученных теоретических и экспериментальных результатов получен алгоритм управления работой электроактиватора в соответствии, с которым разработана принципиальная электрическая схема управления проточным электроактиватором воды на базе микроконтроллера PIC16F1827.

8. Проведенные полевые испытания проточного электроакти-ватора для профилактической обработки ульев показали снижение заболеваемости пчел в опытных ульях и сокращение в два раза ис-пользования антибиотиков. Экономическая эффективность приме-нения проточного электроактиватора воды для пасеки в 50 ульев рассчитывалась по 2 вариантам: за счет реализации меда по повы-шенной цене и увеличения медопродуктивности пасеки. По первому варианту ЧДД составил 202 тыс. руб., а срок окупаемости 2,2 года. По второму варианту ЧДД составил 229 тыс. руб., со сроком окупа-емости капиталовложений 1,9 лет.

Рекомендации производству

Установку следует использовать не только для профилактической обработки ульев, но и для обработки пчелоинвентаря и помещений, где он хранится. Наиболее подходящим временем использования установки является диапазон с марта (если позволяют погодные условия) по июнь, т.е. после зимовки и в весенне-летний период, когда пчелиная семья набирает силу. Помимо этого, рекомендуется провести одну-две обработки озоносодержащим анолитом в начале осени в сухую погоду.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Необходимо проводить дальнейшую модернизацию электроактиватора для повышения его эксплуатационных показателей. Стоит выработать методику, по которой производится обработка пчелиных ульев озоносодержащим анолитом с комплексом организационных мероприятий для более существенного снижения количества болезнетворных микроорганизмов и наращивания силы пчелиной семьи в весенне-летний период. Для полноты использования выходных растворов электроактиватора провести исследования по использованию католита для приготовления подкормок и поения пчел.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ

- в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Моделирование тепловых процессов в электроактиваторе / С. В. Оськин, А. П. Волошин, **Е. С. Цокур** [и др.] // Сельский механизатор. – 2020. – № 5-6. – С. 44–45.

2. Моделирование режимов озонатора в программе SiminTech / Н. С. Баракин, А. П. Волошин, **Е. С. Цокур**, А. А. Лоза // Сельский механизатор. – 2023. – № 12. – С. 36–37.

3. Хранение электроактивированных растворов / А. В. Богдан, В. В. Тропин, **Е. С. Цокур** [и др.] // Сельский механизатор. – 2023. – № 11. – С. 26–27.

- патенты:

4. Патент № 2710569 С1 Российская Федерация, МПК С02F 1/461, С25В 15/02, С25В 11/03. Электроактиватор воды : №

2019120486 : заявл. 28.06.2019 : опубл. 27.12.2019 / С. В. Оськин, С. А. Николаенко, **Е. С. Цокур** [и др.]; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». – 5 с.

5. Патент № 2802694 С1 Российская Федерация, МПК С02F 1/461. Проточный диафрагменный электролизер воды : № 2022129205 : заявл. 08.11.2022 : опубл. 30.08.2023 / С. В. Оськин, А. С. Оськин, **Е. С. Цокур** [и др.]; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». – 4 с.

6. Патент на полезную модель № 218329 U1 Российская Федерация, МПК С02F 1/461, С25В 9/17. Проточный бездиафрагменный электролизер воды : № 2022129907 : заявл. 17.11.2022 : опубл. 22.05.2023 / С. В. Оськин, А. С. Оськин, **Е. С. Цокур** [и др.]; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». – 7 с.

- в других изданиях:

7. Simulation of thermal processes in greenhouse / S. Oskin, **E. Tsokur**, A. Voloshin [et al.] // Engineering for Rural Development: 20, Virtual, Jelgava, 26–28 мая 2021 года. – Virtual, Jelgava, 2021. – P. 1715-1721.

8. **Цокур, Е. С.** Совершенствование технологии получения дезинфицирующих растворов на пасеке / Е. С. Цокур // Современные векторы развития науки : Сборник статей по материалам ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2023 год, Краснодар, 06 февраля 2024 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2024. – С. 725-726.

9. Оськин, С. В. Использование электрооборудования для активации водных растворов в АПК / С. В. Оськин, Д. С. Цокур, **Е. С. Цокур** // Малая энергетика: проблемы, задачи и перспективы : Материалы Международной научно-практической конференции, Краснодар, 15–16 июня 2023 года. – Краснодар: ФГБУ "Российское энер-

гетическое агентство" Минэнерго России Краснодарский ЦНТИ-филиал ФГБУ "РЭА" Минэнерго России, 2023. – С. 100-105.

10. **Цокур, Е. С.** Электроактиватор для АПК / Е. С. Цокур // Точки научного роста: на старте десятилетия науки и технологии : Материалы ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2022 г., Краснодар, 12 мая 2023 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2023. – С. 858-859.

11. **Цокур, Е. С.** Применение электроактивированного раствора в птицеводстве / Е. С. Цокур, Д. С. Цокур // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : Сборник статей по материалам 75-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2019 год, Краснодар, 02–16 марта 2020 года / Отв. за выпуск А.Г. Кощаев. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2020. – С. 955-956.

12. Чухрай, Е. В. Разработка проточного водонагревателя воды для поения пчёл зимой / Е. В. Чухрай, **Е. С. Цокур** // Проблемы и перспективы в международном трансфере инновационных технологий: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Пермь, 12 февраля 2018 года. – Пермь: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2018. – С. 232.

Формат 60×84 1/16

Бумага офсетная

Уч.-изд. л. 1

Тираж 100 экз.

Офсетная печать

Заказ №11

Отпечатано в типографии ООО «Крон»
350051, г. Краснодар, ул. Дальняя, 39\3