

На правах рукописи



Лоза Андрей Александрович

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ УСТАНОВКИ ДЛЯ
ГРУППОВОЙ ОБРАБОТКИ ОЗОНОМ ПЧЕЛИНЫХ УЛЬЕВ**

Специальность 4.3.2 – Электротехнологии, электрооборудование
и энергоснабжение агропромышленного комплекса

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар – 2024

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 Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, кафедра автоматизации и роботизации технологических процессов, заведующий (г. Москва)
	Чернышов Алексей Викторович кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени Императора Петра I», кафедра сельскохозяйственных машин тракторов и автомобилей, доцент (г. Воронеж)
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» (г. Рязань)

Защита состоится «28» июня 2024 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, Кубанский ГАУ, корпус факультета энергетики, ауд. 110.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г., размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ <https://vak.minobrnauki.gov.ru> и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Сегодня в пчеловодстве для лечения и профилактики болезней пчел в основном используют химические препараты с антибиотиками. Это приводит к высокой вероятности попадания лекарств в продукты пчеловодства, что опасно при их потреблении. Известно, что многие микроорганизмы привыкают к воздействию химических препаратов и пчеловоды вынуждены либо увеличивать дозу применения, либо менять лекарство. Становится актуальным поиск новых технологий профилактики и механизмов действия на вредителей и болезней.

В Кубанском ГАУ проводятся исследования, расширяющие применение в пчеловодстве электротехнологических методов борьбы с болезнями пчел. Овсянниковым Д.А. была предложена технология применения озонирования пчелиных семей, а его учеником – Николаенко С.А. разработана система стабилизированного озонирования пчел. Однако ими в большинстве случаев проводились эксперименты на отдельных ульях. Появление нестабильных результатов озонирующей установки при обработке нескольких ульев показало необходимость проведения дополнительных исследований. При обработке несколько ульев одной установкой необходимо учитывать наличие пчелиных семей с разным количеством обсиживаемых пчелами рамок, и требуется корректировка работы установки при отключении отдельных семей.

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

Степень разработанности темы. Большой вклад в развитие установок, облегчающих труд пчеловодов, внесли учёные ФГБОУ ВО РГАТУ имени П.А. Костычева (г. Рязань). Вопросами озонирования и эффективности работы электроозонаторных установок в сельском хозяйстве занимались: В.Ф. Сторчевой, А.В. Чернышов, Д.А. Овсянников, С.А. Николаенко, Д.А. Нормов, Н.В. Ксенз и другие. Несмотря на глубину проводимых исследований и доказанную ими эффективность применения озона, в том числе и в пчеловодстве, установки для его получения требуют совершенствования, в частности решения проблемы групповой обработки пчелиных семей. Несмотря на большую работу, проделанную исследователями по внедрению озонирующих установок в пчеловодстве существующие озо-

наторы, не учитывают необходимость дозированной подачи озона в ульи с разным количеством рамок. Все это ведет либо к недополучению требуемой дозы озона ульями, либо к перерасходу электрической энергии с увеличением времени работы установки на пасеке.

Научная гипотеза. Исследование физико-химических процессов в установке для групповой обработки озоном разной силы пчелиных семей позволит определить параметры и режимы ее работы, повысит стабильность получаемого лечебно-профилактического эффекта в пчеловодстве.

Целью работы является обоснование параметров и режимов работы установки для групповой обработки озоном пчелиных ульев для повышения эффективности проведения лечебно-профилактических мероприятий на пасеке.

Задачи исследования.

1. Обосновать технологическую схему и процесс работы озонирующей установки для групповой обработки озоном пчелиных ульев с разным количеством обсиживаемых пчелами рамок.

2. Разработать геометрическую модель установки для ее последующего математического описания и компьютерного моделирования физико-химических процессов в ней.

3. Разработать математическую модель, описывающую физико-химические процессы в озонаторе для ее реализации программном комплексе Comsol Multiphysics.

4. В программном комплексе Comsol Multiphysics провести компьютерное моделирование математической модели физико-химических процессов в озонирующей установке и получить ее рациональные параметры и режимы работы.

5. Разработать алгоритм и принципиальную электрическую схему управления установкой для групповой обработки озоном пчелиных ульев.

6. Изготовить установку для групповой обработки озоном пчелиных ульев, провести экспериментальные исследования по сопоставлению опытных данных с результатами моделирования.

7. Провести исследования по влиянию озона на выживаемость плесневых грибов, получить соответствующие регрессионные модели и на этой основе определить параметры и режимы работы озонирующей установки.

8. Обосновать экономическую эффективность использования установки для групповой обработки озонем пчелиных ульев на пасеке.

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

Объект исследования установка для групповой обработки озонем пчелиных ульев.

Предмет исследования – параметры и режимы работы установки для групповой обработки озонем пчелиных ульев, зависимости влияния концентрации озона и времени обработки на выживаемость плесневых грибов.

Научная новизна работы:

- математическая модель физико-химических процессов в озонаторе установки для групповой обработки озонем пчелиных ульев;
- алгоритм управления групповой обработкой пчелиных ульев, учитывающий: количество обсиживаемых пчелами рамок, изменение расхода озонородушной смеси при отключении отдельных воздухопроводов, получаемую дозу озона;
- регрессионные зависимости влияния концентрации озона и времени обработки на выживаемость плесневых грибов;
- обоснованные параметры и режимы работы установки для групповой обработки озонем пчелиных ульев.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- математическая модель физико-химических процессов, протекающих в озонаторе, позволяющая описать концентрации озона в геометрических частях конструкции и определить рациональные места подключения выходных патрубков;
- зависимости изменение расхода озонородушной смеси через воздухопроводы при их последовательном отключении от ульев, необходимые для определения дозы озона на отдельные ульи;
- алгоритм групповой обработки пчелиных ульев, дающий возможность разработать программу для системы управления процессом озонирования;
- обоснованные параметры и режимы работы установки для групповой обработки озонем пчелиных ульев, позволяющие повысить

снять эффективность проведения лечебно-профилактических мероприятий на пасеке;

- принципиальная электрическая схема системы управления озонирующей установкой, дающая возможность изготовить опытный образец с минимальными затратами;

- изготовленная система управления, которая проводит расчет времени обработки отдельных ульев и управляет подачей озоноздушнoй смеси в зависимости от числа рамок в них;

- регрессионная модель влияния концентрации озона и времени обработки на выживаемость плесневых грибов, позволяющая расширить функционал установки и получить обоснованную дозу озонной обработки пчелиных ульев.

Реализация результатов исследований. Результаты исследований внедрены в ИП глава КФХ Овсянников Дмитрий Алексеевич (Краснодарский край). Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе на факультете энергетики Кубанского ГАУ.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается: методами компьютерного моделирования в ПО Comsol Multiphysics 6.1 и обработкой экспериментальных данных с помощью ПО STATISTICA, использованием современной измерительной аппаратуры.

Основные положения и выводы диссертации доложены и одобрены на ежегодных научных конференциях факультета энергетики КубГАУ (2020–2022 гг.); на XIV Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе» 28–29 мая 2021 г. (г. Ставрополь); на I Национальной научно-практической конференции с международным участием имени Г.П. Ерошенко 22 декабря 2023 г. (г. Саратов); на Международной научной конференции «Научные исследования стран ШОС: Синергия и интеграция» 30 сентября 2023 г. (Китай); на XXXIII Международной научно-практической конференции «21 век: фундаментальная наука и технологии» 2-3 октября 2023 г. (Индия).

На защиту выносятся:

- математическая модель, описывающая физико-химические процессы в озонаторе, для обоснования параметров и режимов работы всей установки;
- регрессионная модель влияния концентрации озона и времени обработки на выживаемость плесневых грибов;
- алгоритм групповой обработки пчелиных ульев, учитывающий: количество рамок в каждом улье, изменение расхода озонозодушной смеси через воздухопроводы;
- обоснованные параметры и режимы работы установки для групповой обработки озонем пчелиных ульев;
- результаты экспериментальных исследований и их сопоставление с результатами моделирования.

Публикации результатов работы. Основное содержание диссертации отражено в 13 печатных работах, в том числе: 8 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК России, 1 статья в международной базе данных Scopus, 4 статьи – в других изданиях.

Объем и структура работы. Диссертация содержит введение, 3 главы, заключение, список литературы, включающий 120 наименований, приложения. Текст диссертации изложен на 142 страницы машинописного текста, включая 23 страницы приложений; содержит 47 рисунков и 12 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

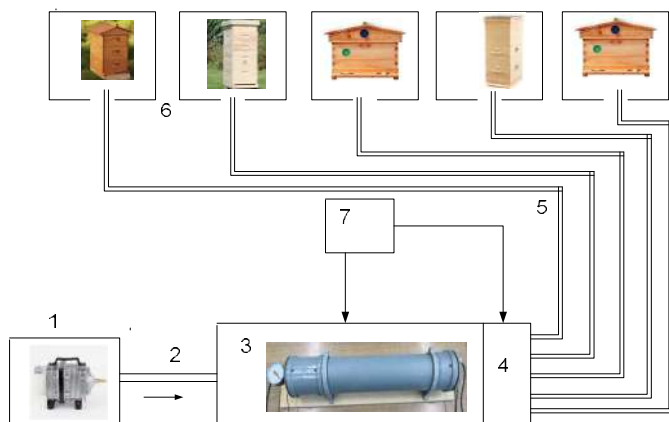
Во введении изложены актуальность исследований, цель работы, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ состояния и перспектив пчеловодства в России. Определено, что болезни пчел являются фактором, сильно дестабилизирующим производительность пасеки. В большинстве проводимых лечебно-профилактических мероприятий пчеловоды используют антибиотики. Это приводит к загрязнению продуктов пчеловодства и тем самым угрожает здоровью человека. Поэтому актуален поиск других - экологически чистых способов лечения пчел. Проведенный анализ литературных источников показал, что среди всех имеющихся на сегодняшний день немедикаментозных способов лечения наиболее приемлема лечено-

профилактическая обработка пчелиных семей озонем. Благодаря работам Овсянникова Д.А., Николаенко С.А., Нормова Д.А. на сегодняшний день хорошо известны режимы работы озонаторов для стимуляции весеннего развития пчелиных семей, а также для профилактики и лечения их бактериозов. Все же ситуация с исследованием режимов работы озонаторов для лечения микозов пчел неоднозначная и требует дополнительных изучений. Несмотря на проведенные ранее многочисленные исследования до сих пор не решены вопросы групповой обработки ульев, что приводит к нестабильности эффекта, недополучению ульями требуемых доз газа, а в некоторых случаях - к перерасходу электроэнергии. Это приводит к необходимости проведения научных изысканий, направленных на совершенствование групповой обработки ульев с помощью озонирующих установок. Появление у ученых новых программных продуктов позволяет проводить такие исследования на высоком уровне и значительной достоверностью.

Сформулирована цель работы и задачи исследования.

Во второй главе представлено математическое и компьютерное моделирование физико-химических процессов в озонирующей установке для групповой обработки ульев. На рисунке 1 приведена технологическая схема озонирования группы ульев.



- 1 – компрессор; 2 – подающая магистраль воздуха; 3 – озонатор барьерного типа; 4 – распределитель озонозвушной смеси, с электромагнитными клапанами; 5 – подающие магистрали озонозвушной смеси в ульи; 6 – ульи; 7 – система управления установкой

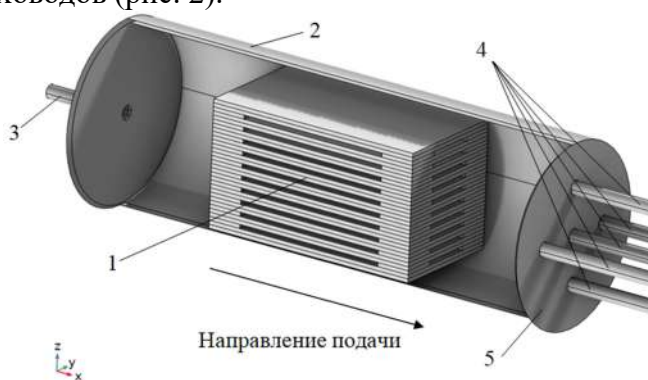
Рисунок 1 – Технологическая схема озонирования группы ульев

Определены дозы озона на 1 пчелиную рамку: для проведения стимуляции весеннего развития пчел – 64,5 мг; для проведения лечебно-профилактических обработок от бактериозов пчел – 2,5 мг. Получена формула расчета времени обработки ульев $T_{обр}$:

$$T_{обр} = \frac{m_{1рамки} \cdot n}{Q_k \cdot C_{O_3}} \quad (1)$$

где $m_{1рамки}$ – масса озона, которую должна получить 1 рамка, мг; n – количество рамок в улье, шт.; Q_k – производительность подающего компрессора, м³/ч; C_{O_3} – концентрация озона, мг/м³.

Разработана конструкция и геометрическая модель озонирующей установки для групповой обработки озонем пяти пчелиных ульев. Модель разработана в ПО Comsol Multiphysics и в нее входит: стеклянное разрядное устройство барьерного типа, заключенное в цилиндрический корпус; в одном торце корпуса расположен цилиндрический патрубок для соединения с компрессором, в другом – пять воздухопроводов (рис. 2).



1 – разрядное устройство; 2 – корпус; 3 – патрубок для подвода воздуха от компрессора, 4 – воздухопроводы для подачи озонозооной смеси к ульям; 5 – выходной блок озонатора

Рисунок 2 – Изображение геометрической модели озонатора с разрядным устройством барьерного типа

Для проведения компьютерного моделирования использовался Comsol Multiphysics 6.1. Основными физическими интерфейсами были выбраны: «Plasma» - для определения концентрации озона генерируемой в области разрядных промежутков, «Turbulent Flow» - для определения скоростей воздуха u и давлений p внутри озониру-

ющей установки и «Transport of Diluted Species» - для определения концентрации озона в воздушных областях вне разрядного устройства.

Концентрацию озона в области разрядных промежутков можно найти из следующего уравнения:

$$\rho \frac{\partial c_{O_3}}{\partial t} + \rho(v \cdot \nabla)c_{O_3} = R_{O_3} \quad (2)$$

где ρ – плотность газовой смеси, кг/м³; c_{O_3} – относительная массовая доля озона, о.е.; v – скорость воздуха озоновоздушной смеси, м/с; R_{O_3} – скорость химической реакции с участием озона, кг/(м³·с).

Транспортные свойства электронов определялись с помощью функции распределения энергий электронов по Максвеллу:

$$f(\varepsilon) = \varphi^{-3/2} \beta_1 \exp(-(\varepsilon\beta_2 / \varphi)), \quad (3)$$

где $\beta_1 = \Gamma(5/2g)^{3/2} \Gamma(3/2g)^{-5/2}$ и $\beta_2 = \Gamma(5/2g)\Gamma(3/2g)^{-1}$, безразмерные коэффициенты; ε – энергия электрона, эВ; φ – средняя энергия электрона, эВ; g – безразмерный коэффициент, который для принятой ФРЭЭ равен 1; Γ – неполная гамма-функция.

Для описания изменения распределения (переноса) электронов в разрядном промежутке во времени и в пространстве использовалось уравнение Больцмана:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \left(\frac{\partial \Gamma_e}{\partial x} + \frac{\partial \Gamma_e}{\partial y} + \frac{\partial \Gamma_e}{\partial z} \right) = - \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) n_e, \quad (4)$$

где n_e – плотность электронов, 1/м³; Γ_e – поток электронов, 1/(м²·с).

Поток электронов Γ_e под действием электрического поля определялся следующим образом:

$$\Gamma_e = -(\mu_e \cdot E)n_e - D_e \cdot \left(\frac{\partial n_e}{\partial x} + \frac{\partial n_e}{\partial y} + \frac{\partial n_e}{\partial z} \right), \quad (5)$$

где μ_e – подвижность электронов, м²/(В·с); E – напряженность электрического поля, В/м; U – напряжение подаваемое на электроды, В; D_e – диффузия электронов, м²/с, равная: $D_e = \mu_e T_e$; T_e –

статистическая характеристика средней кинетической энергии электронов $T_e = \frac{2}{3} \varphi$, эВ.

Для определения напряженности электрического поля E в модели использовались следующие уравнения:

$$E = -\left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial U}{\partial z}\right) \text{ и } \nabla(\varepsilon_0 \varepsilon_d E) = \rho_V; \quad (6)$$

где ε_0 - электрическая постоянная, равная $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ε_d - относительная диэлектрическая проницаемость среды, о.е.; ρ_V - объемная плотность заряда, Кл/м³, определяемая как: $\rho_V = -(n_e / N_A) \cdot F$, где N_A - число Авогадро, 1/моль; F - постоянная Фарадея, Кл/моль.

Определено, что в установке будет преобладать турбулентное течение газа. Поэтому для описания такого течения использовалась модель турбулентности Algebraic uPlus для сжимаемой среды.

В областях вне разрядного устройства массоперенос озона будет зависеть от диффузии и конвекции газа. Этот процесс может быть описан следующим уравнением:

$$\frac{\partial c_{O_3 \text{ diluted}}}{\partial t} + \nabla J_{O_3} + v \nabla c_{O_3 \text{ diluted}} = R_{O_3} \quad (7)$$

где $c_{O_3 \text{ diluted}}$ - концентрация озона вне разрядных промежутков, моль/м³; J_{O_3} - плотность потока озона, вызванного диффузией, определяется уравнением Фика: $J_{O_3} = -D \nabla c_{O_3}$, моль/(м²·с); D - коэффициент диффузии озона (для озона $D = 0,0000157$ м²/с), м²/с.

На входном сечении патрубку, через который производится подача воздуха в электроозонатор, задавалось граничное условие «Fan» определяющее зависимость давления p от производительности Q_k компрессора:

$$n^T (-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot u)I n = -p_{in} \quad (8)$$

$$p_{in} \geq p = f(Q_k)$$

где n - вектор нормали к задаваемой поверхности; p_0 - давление на входе в установку, Па.

Граничное условие «Outlet», определяющее выход газа из установки, было задано в соответствии с уравнением:

$$n(-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)) = -p_{out}n \quad (9)$$

где p_{out} – давление на выходе из установки, Па.

Таким образом, с учетом рассмотренных уравнений, математическая модель в ПО Comsol имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{\partial c_i}{\partial t} + \rho(v \cdot \nabla)c_i = R_i \\ f(\varepsilon) = \varphi^{-3/2} \beta_1 \exp(-(\varepsilon\beta_2 / \varphi)) \\ \frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \left(\frac{\partial \Gamma_e}{\partial x} + \frac{\partial \Gamma_e}{\partial y} + \frac{\partial \Gamma_e}{\partial z} \right) = - \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) n_e \\ E = - \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial U}{\partial z} \right), \nabla(\varepsilon_0 \varepsilon_d E) = \rho_V \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v \nabla v = -\nabla p + \nabla K + \rho g \\ \frac{\partial c_{O_3 diluted}}{\partial t} + \nabla J_{O_3} + v \nabla c_{O_3 diluted} = R_{O_3} \\ n^T (-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot u)I n = -p_{in} \\ p_{in} \geq p = f(Q_k) \\ n(-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)) = -p_{out}n \end{array} \right. \quad (10)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с; p – давление воздуха внутри установки, Па; I – единичный вектор; g – ускорение свободного падения, м/с²; μ_T – турбулентная вязкость, Па·с.

В результате проведения компьютерного моделирования разработанной модели физико-химических процессов в электроозонаторе были получены поля распределения концентраций озона (рис. 3, 4).

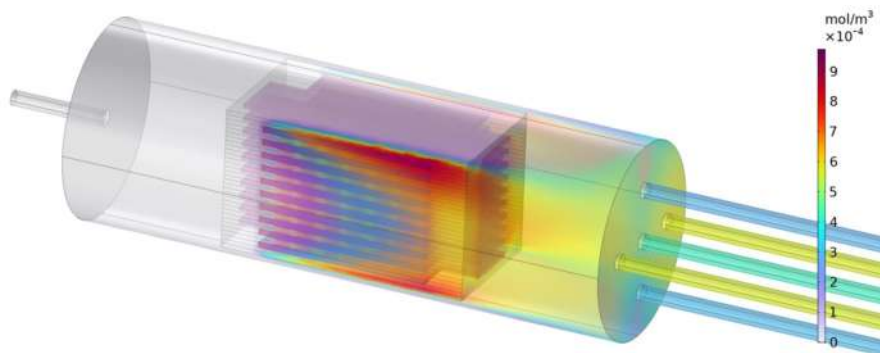


Рисунок 3 – Изображение распределения концентраций озона внутри установки

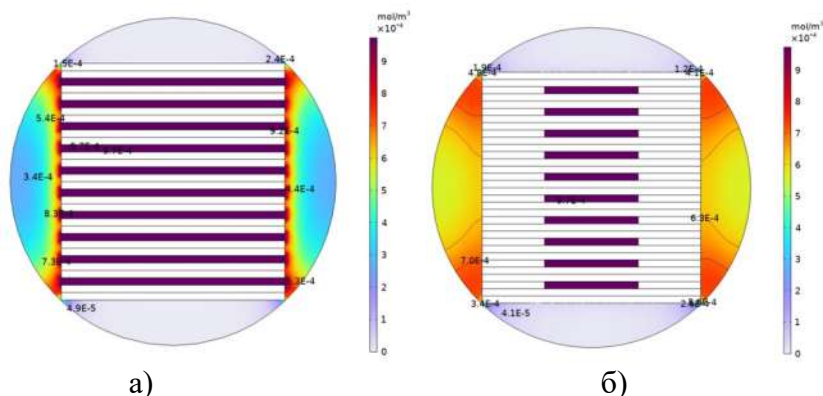


Рисунок 4 – Изображения распределения концентраций озона в поперечных сечениях: в середине разрядного устройства (а), на выходе из него (б)

Из рисунков 3 и 4 видно, что концентрации озона внутри установки распределены неравномерно. Неравномерность также наблюдается и в пяти отводящих воздуховодах. Наблюдается значительная разница в концентрациях озона в отдельных воздуховодах – от $2,7 \cdot 10^{-4}$ моль/м³ до $5,6 \cdot 10^{-4}$ моль/м³, т.е. в 2 раза. Наибольшие концентрации озона достигаются в боковых воздуховодах установки – $5,6 \cdot 10^{-4}$ моль/м³ (или 26,8 мг/м³). В воздуховоде, установленном в центре выходного блока озонатора, концентрация озона составляет – $4,4 \cdot 10^{-4}$ моль/м³ (21 мг/м³). Наименьшая концентрация газа наблюдается в верхнем и нижнем воздуховодах, соответственно равна $2,7 \cdot 10^{-4}$ моль/м³, $2,8 \cdot 10^{-4}$ моль/м³ (12,9 мг/м³ и 13,4 мг/м³). Такая неравно-

мерность подачи озона при групповой обработке приведет к сложностям расчетов необходимых доз в отдельный улей. На поперечных сечениях установки представленных на рисунке 4 видно, что часть озона покидает разрядный промежуток через его боковые отверстия, что, по всей видимости, способствует созданию неравномерности озона в воздуховодах. В то же время концентрация озона внутри разрядных промежутков практически остается неизменной.

В результате проведения итерационного моделирования различных конструкций удалось получить приемлемый вариант, заключающийся в повороте выходного блока (отверстий для воздухопроводов, подводящих озон к ульям) на 90° относительно всей конструкции (рис. 5).

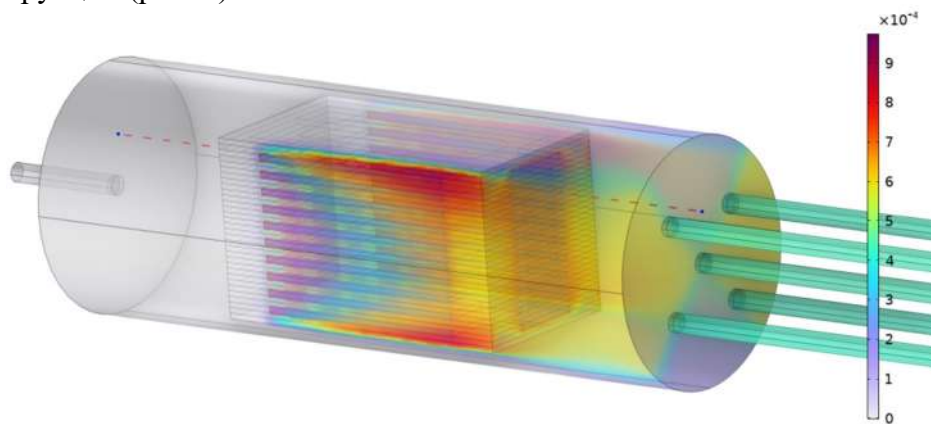


Рисунок 5 - Изображение распределения концентраций озона внутри установки в результате поворота выходного блока на 90° .

Для разработки алгоритма обработки группы ульев важно знать изменение подачи озонородной смеси в каждый улей при последовательном отключении воздухопроводов. Для этого было определено поле скоростей озонородной смеси внутри установки при обработке пяти ульев. Результаты расчета скоростей, а также объемного расхода смеси через выходные сечения воздухопроводов при их последовательном отключении представлены в виде графиков на рисунке 6. Исследование проводилось в несколько итераций при последовательном исключении воздухопроводов из рассматриваемой расчетной области.

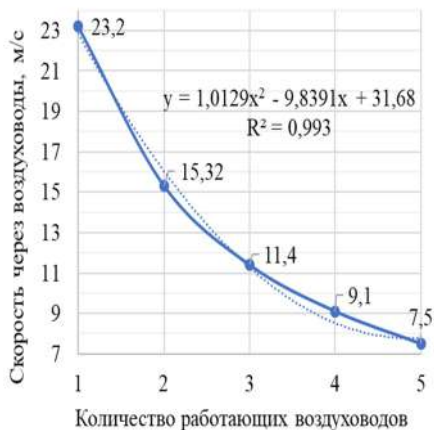
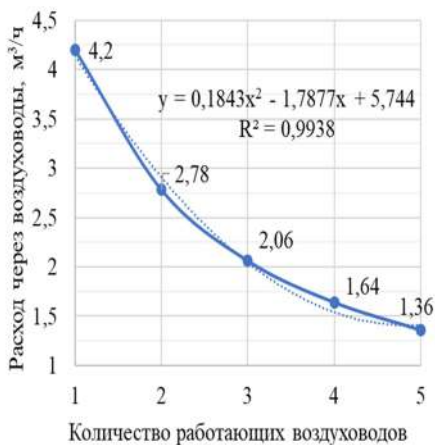


Рисунок 6 – Графики расхода (слева) озонозооозушной смеси через воздуховоовы и скорости (справа) в зависимости от их количества при подаче возооза от компрессора производительностью 125 л/мин

Установлена зависимость расхода озонозооозушной смеси через воздуховоовы от их количества. Например, при использовании компрессора номинальной производительностью 125 л/мин и при последовательном отключении с пятого по первый воздуховоов соответственно производительности составили: 1,36 м³/ч, 1,64 м³/ч, 2,06 м³/ч, 2,78 м³/ч и 4,2 м³/ч.

На основании полученных теоретических результатов был разработан алгоритм групповой обработки пяти пчелиных ульев, учитывающий, количество рамок в каждом обрабатываемом улье, изменение расхода озонозооозушной смеси через воздуховоовы при их последовательном отключении, характеристику компрессора, а также дозу озона уже полученную ульями. Алгоритм позволяет произвести расчет времени обработки каждого из пяти ульев, в зависимости от необходимой дозы озона на одну пчелиную рамку. В соответствии с алгоритмом и результатами теоретических исследований разработана принципиальная электрическая схема системы управления озонирующей установкой. Такая система управления позволяет проводить следующее: расчет времени работы установки на отдельных ульях, управлять подачей озонозооозушной смеси в пчелиные ульи (рис. 7).

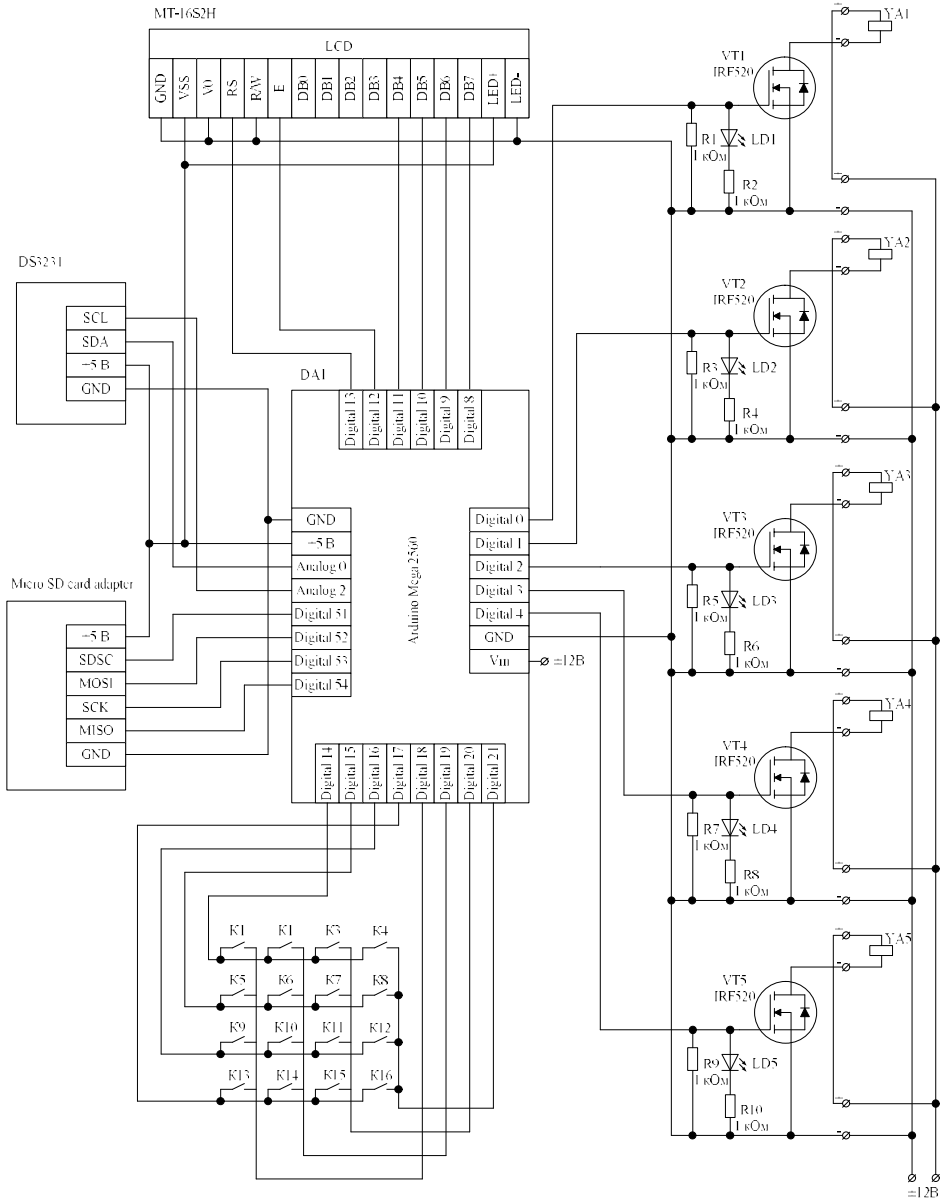


Рисунок 7 – Схема принципиальная электрическая системы управления озонирующей установкой рассчитанной на обработку группы из пяти ульев

В третьей главе представлены экспериментальные исследования. Проведение экспериментов проходило в три этапа. На первом этапе проводились исследования по подтверждению результатов теоретических исследований. Для этого на кафедре электрических машин и электропривода Кубанского ГАУ была изготовлена экспериментальная установка, которая показана на рисунке 8.



1 – корпус озонатора; 2 – выходной блок озонатора; 3 – патрубки для подключения воздухопроводов

Рисунок 8 – Фотография экспериментальной установки

Экспериментальные исследования физико-химических процессов в озонаторе показали следующее: относительные ошибки по сравнению с теорией - по концентрации озона не более 10,3%; по скорости и расходу озоновоздушной смеси через воздухопроводы не более 8,9 %. Проведенное статистическое сравнение теоретических и экспериментальных данных по t-критерию Стьюдента при уровне значимости $p = 0,01$ подтвердило отсутствие статистических различий между ними.

На втором этапе проводились исследования влияния озоновоздушной смеси на тест-объект, в качестве которого выступал плесневелый гриб *Penicillium sp.* Результаты исследования представлены в таблице 1 и на рисунке 9.

Таблица 3.1 – Результаты исследования влияния параметров озонОВОЗДУШНОЙ обработки на ВЫЖИВАЕМОСТЬ *Penicillium sp.*

№ Опыта N=9	Концентрация озона x_1 , мг/м ³	Время озонирования x_2 , мин	Число <i>Penicillium sp.</i> после воздействия, КОЕ/см ³	Выживаемость <i>Penicillium sp.</i> после воздействия y_1 , %
Контроль	0	0	$8,8 \cdot 10^{10}$	100%
1.	500	30	$2,2 \cdot 10^{10}$	25
2.	500	60	$1 \cdot 10^{10}$	11,4
3.	500	90	0	0
4.	1200	30	$2,1 \cdot 10^{10}$	23,9
5.	1200	60	$2 \cdot 10^9$	2,27
6.	1200	90	0	0
7.	2000	30	$1 \cdot 10^{10}$	11,4
8.	2000	60	$1 \cdot 10^9$	1,14
9.	2000	90	0	0

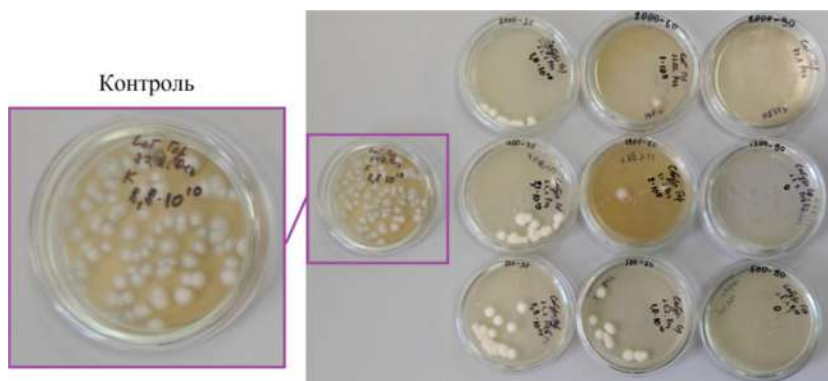


Рисунок 9 – Изображение чашек Петри с посевами тест-объекта контрольной группы и после обработки озоновоздушной смесью

Проведен регрессионный анализ полученных результатов. На его базе построена эмпирическая модель в виде полинома второй степени:

$$y_1 = 62,7641 - 0,0132x_1 - 1,2063x_2 - 5,3849 \cdot 10^{-7}x_1^2 + 0,0002x_1x_2 + 0,0057x_2^2 \quad (11)$$

Согласно полученному значению скорректированного коэффициента детерминации R^2_{CKOP} вариации отклика y_1 на 89,1% объясняются факторами x_1 и x_2 . Табличное значение критерия Фишера

$F_{ТАБЛ}$ при уровне значимости $p = 0,05$ равно 9,01, что меньше расчетного $F_{РАСЧ} = 14,145$. Это говорит об адекватности полученной регрессионной модели, т.е. о ее статистической значимости. Анализ экспериментальных данных графически представлен на рисунках 10 и 11.

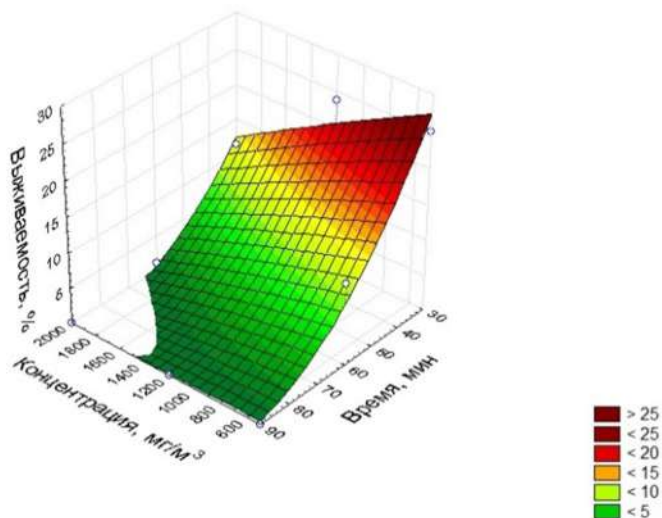


Рисунок 10 – Изображение поверхности полученной по регрессионной модели описывающей влияние концентрации озона и времени его воздействия на значение параметра выживаемости *Penicillium sp.*

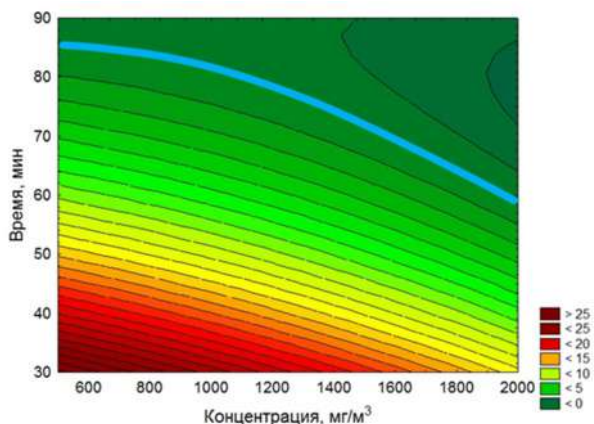


Рисунок 11 – Диаграмма влияния концентрации озона и времени воздействия на значение параметра выживаемости *Penicillium sp.*,

На рисунке 11 показана синяя линия, выше которой находится область с выживаемостью гриба ниже 1,5%. Отсюда следует, что наименьшая доза обработки озоном, которая гарантирует значительную инактивацию *Penicillium sp.*, является 45000 мг·мин/м³, что соответствует следующим параметрам: концентрация озона – 500 мг/м³, время обработки – 90 минут. Тогда, масса озона на 1 пчелиную рамку при обработке ульев от микозов составит согласно формуле (1):

$$m_{1\text{рамки}} = \frac{Q_k \cdot C_{O_3} \cdot T_{обр}}{n} = \frac{1 \cdot 500 \cdot 1,5}{12} = 62,5 \text{ мг} \quad (12)$$

Полученное значение массы озона на 1 рамку практически совпадает с массой озона, полученной для стимуляции весеннего развития пчел ранее (64,5 мг). Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований разработанный ранее алгоритм управления групповой обработкой ульев озоном дополнен ещё одним режимом работы – лечебно-профилактическая обработка от микозов пчел.

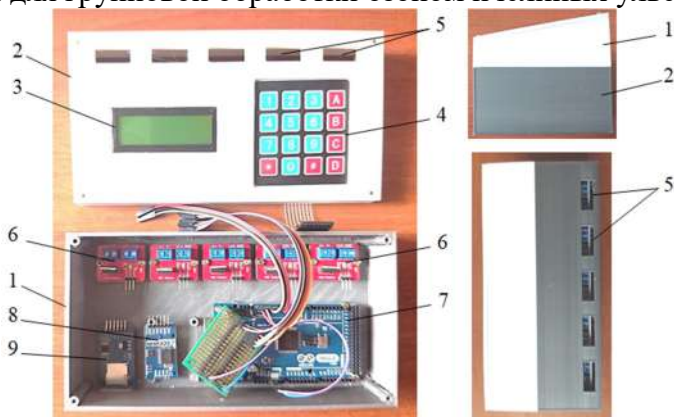
На третьем этапе были проведены полевые испытания установки для групповой обработки озоном пчелиных ульев в ИП глава КФХ Овсянников Д.А. (рис. 12). Для этого, в соответствии с разработанным алгоритмом, и принципиальной электрической схемой было реализовано устройство автоматизированного управления подачей озона в ульи (рис. 13). Отключение подачи происходит посредством перекрытия электромагнитных клапанов. Полевые исследования показали: увеличение силы пчелиных семей в опытной группе на 15-20% по сравнению с контролем; снижение их заклещенности на 5%; увеличение рамок с расплодом на 15% по сравнению с контролем; увеличение медопродуктивности на 10%.

Экономическая эффективность применения установки группового озонирования для пасеки в 50 ульев в виде ЧДД за 5 лет составляет 468 тысяч рублей при сроке окупаемости 1,7 года. Дополнительный доход получен за счет сокращения затрат на лекарственные препараты, увеличения силы пчелиных семей и повышения их медопродуктивности.



1 – озонатор; 2 – воздухопроводы; 3 – устройство автоматизированного управления подачей озона в улья; 4 – электромагнитные клапаны; 5 - компрессор

Рисунок 12 – Фотографии полевых исследований разработанной установки для групповой обработки озона пчелиных ульев.



1 – корпус нижней части устройства; 2 – корпус верхней панели; 3 - LCD-дисплей; 4 – клавиатура 4x4; 5 – отверстия для подключения проводников к силовым ключам; 6 – силовой ключ; 7 - микроконтроллерная плата Arduino Mega 2560; 8 - часы реального времени DS3231; 9 - адаптер карты памяти micro SD

Рисунок 13 – Фотография устройства автоматизированного управления подачей озона в ульи

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Разработана технологическая схема групповой обработки ульев, включающая компрессор, озонатор, магистральные воздуховоды, ульи, систему управления. Определены дозы озона на 1 пчелиную рамку: для проведения стимуляции весеннего развития пчел – 64,5 мг; для проведения лечебно-профилактических обработок от бактериозов пчел – 2,5 мг. Получена формула расчета времени обработки ульев, учитывающая дозу обработки, количество рамок, подачу и концентрацию озона на входе в улей.

2. Разработана геометрическая модель с расчетной сеткой из 4,5 млн. элементов озонирующей установки для групповой обработки озоном пчелиных семей. Модель построена в ПО Comsol Multiphysics и состоит: стеклянного разрядного устройства барьерного типа заключенного в цилиндрический корпус с выходным блоком для подключения воздуховодов.

3. Разработана математическая модель физико-химических процессов в озонирующей установке, включающая в себя начальные и граничные условия в которых заданы значения исследуемых параметров на входных и выходных границах исследуемой геометрической области, а также учитываются характеристики компрессора.

4. Результаты реализации математической модели озонирующей установки в ПО Comsol показали, что поле концентраций озона в воздуховодах неравномерно и может отличаться в 2 раза (от 12,9 мг/м³ до 26,8 мг/м³) при их первоначальном расположении относительно разрядного устройства. Для увеличения равномерности концентраций озона предложено новое расположение воздуховодов (провернув выходной блок на 90°) при котором концентрации в них изменяются от 20,5 мг/м³ до 21 мг/м³.

5. Моделирование в программном продукте позволило определить: потери напора, в озонаторе составившие 400 Па и общие потери напора во всей озонирующей установке равные 4980 Па. Установлена зависимость расхода озоновоздушной смеси через воздуховоды от их количества, например, при использовании компрессора производительностью 125 л/мин и при последовательном отключении с пятого по первый воздуховод соответственно производительности составили: 1,36 м³/ч, 1,64 м³/ч, 2,06 м³/ч, 2,78 м³/ч и 4,2 м³/ч.

6. Разработан алгоритм управления режимом работы озонирующей установки, учитывающий количество рамок в каждом обрабатываемом улье, изменение расхода озоновоздушной смеси через воздухопроводы, характеристику компрессора, а также дозу озона. Получена принципиальная электрическая схема системы управления озонирующей установки, позволяющая рассчитывать режим работы установки и управлять подачей озоновоздушной смеси в пчелиные ульи.

7. Изготовлена установка для групповой обработки озоном пяти пчелиных ульев, которая может работать в следующих режимах: стимуляция весеннего развития пчел, лечебно-профилактическая обработка от бактериальных заболеваний и микозов пчел. Проведённые экспериментальные исследования по подтверждению теоретических положений показали следующее: относительные ошибки по сравнению с теорией - по концентрации озона не более 10,3%; по скорости и расходу озоновоздушной смеси через воздухопроводы не более 8,9 %. Статистическое сравнение теоретических и экспериментальных данных по t-критерию Стьюдента при уровне значимости $p = 0,01$ подтвердило отсутствие статистических различий между ними.

8. Получена и проанализирована регрессионная модель, описывающая влияние параметров озонирования ульев с пчелами на выживаемость гриба *Penicillium sp.* Данная регрессионная модель обосновывает снижение выживаемости *Penicillium sp.* ниже 1,5% при изменении концентрации озона от 500 до 2000 мг/м³; времени обработки от 60 до 90 минут. Определена масса озона в улье для лечения микозов пчел - 64,5 мг на 1 рамку.

9. Проведенные полевые испытания установки для групповой обработки озоном пчелиных ульев показали следующее: увеличение силы пчелиных семей в опытной группе на 15-20% по сравнению с контролем; снижение их заклещеванности на 5%; увеличение рамок с расплодом на 15% по сравнению с контролем; увеличение медопродуктивности на 10%.

10. Экономическая эффективность применения установки группового озонирования для пасеки в 50 ульев в виде ЧДД за 5 лет составляет 468 тысяч рублей при сроке окупаемости 1,7 года. Дополнительный доход получен за счет сокращения затрат на лекар-

ственные препараты, увеличения силы пчелиных семей и повышения их медопродуктивности.

Рекомендации производству

Наиболее выгодно применять установку для групповой обработки пчелиных семей для пасек с количеством ульев начиная с 20 штук. Такое оборудование позволит сократить трудоемкость лечебно-профилактических работ и сократить применение химических препаратов. Озонирующую установку нужно применять в комплексе с организационными и профилактическими мероприятиями, принятыми для использования в конкретном регионе. Эффективно также организовать малое серийное производство установок для групповой обработки ульев с учетом потребностей региона.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Перспективно модернизировать установку для групповой обработки пчелиных семей с целью увеличения количества подключаемых обрабатываемых ульев. Проанализировать возможность создания общей установки, включающей компрессор, озонатор, систему управления. Необходимо предусмотреть выходы из системы управления на компьютер для анализа обстановки по каждому улью и разработки рекомендаций по лечению и профилактики.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ

- в изданиях, индексируемых в *Scopus* и *Web of Science*:

1. Loza, A.A. Simulation of bee aggregation in the hive during changes in honey supply / S.V. Oskin, I.N. Shishigin, D.S. Tsokur // *Journal of Physics: Conference Series*. – Vol. 224. – p. 012037.

- в изданиях, рекомендованных *ВАК*:

2. Лоза, А.А. Моделирование основных физических процессов в биологических и технических системах сельского хозяйства/С.В. Оськин, Д.С. Цокур, Шишигин И.Н., Лоза А.А. // *Сельский механизатор*. –2020. – № 7. –С. 25-27.

3. Лоза, А.А. Повышение энергетической эффективности отраслей агропромышленного комплекса / С.В. Оськин, А.В. Коржаков, А.А. Лоза // Сельский механизатор. – 2022. – № 1. – С. 42-43.

4. Лоза, А.А. Необходимость модернизации основных технологических процессов в пчеловодстве / С.В. Оськин, А.А. Лоза, С.М. Федак, М.М. Украинцев // Сельский механизатор. – 2022. – № 12. – С. 6-7.

5. Лоза, А.А. Параметры сушилки сельскохозяйственной продукции / С.В. Оськин, Д.С. Цокур, А.А. Лоза // Техника и оборудование для села. – 2022. – № 11 (305). – С. 40-43.

6. Лоза, А.А. Моделирование температурно-влажностного режима в пчелином улье / С.В. Оськин, А.А. Лоза, С.М. Федак // АПК России. – 2023. – Т. 30. – № 2. – С. 223-229.

7. Лоза, А.А. Обоснование параметров системы группового озонирования ульев / С.В. Оськин, А.А. Лоза // Международный научно-исследовательский журнал. — 2023. — №12 (138). — URL: <https://research-journal.org/archive/12-138-2023-december/10.23670/IRJ.2023.138.20> (дата обращения: 06.01.2024). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.138.20

8. Лоза, А.А. 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. DOI: 10.47336/0131-7393-2023-12-36-37-44.

9. Исследование ускоренного режима сушки продуктов пчеловодства / С. В. Оськин, А. А. Лоза, С. М. Федак, М. М. Украинцев // Сельский механизатор. – 2023. – № 3. – С. 27-29.

- в других изданиях:

10. Лоза, А.А. Моделирование физико-химических процессов в электроозонаторе для пчеловодства / А.А. Лоза // 21 век: фундаментальная наука и технологии: Материалы XXXIII международной научно-практической конференции. – Индия, 2-3 октября 2023 года. – С. 109-111.

11. Лоза, А.А. Особенности озоноздушной обработки пчелиных ульев / А.А. Лоза // Научные исследования стран ШОС: Синергия и интеграция: Материалы Международной научной конференции – Китай, 30 сентября 2023 года. – С. 193-197.

12. Лоза, А.А. Обработка озоном группы пчелиных ульев / А.А. Лоза // Повышение эффективной эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве: Материалы I Национальной научно-практической конференции с международным участием имени Г.П. Ерошенко. – Саратов, 22 декабря 2023 года. Саратов: ФГБОУ ВО Вавиловский университет, 2023. – С. 210-214.

13. Лоза, А. А. Режимы работы центрифуг для откачки меда / С. В. Оськин, А. А. Лоза // Физико-технические проблемы создания но-вых технологий в агропромышленном комплексе : Материалы XIV Международной научно-практической конференции, Ставрополь, 28–29 мая 2021 года / Под редакцией М.А. Мастепаненко, Г.П. Стародубцевой [и др.]. – Ставрополь: Общество с ограниченной ответственностью "СЕКВОЙЯ", 2021. – С. 80-84.

Подписано к печати 15.04. 2024

Бумага офсетная

Уч.-изд. л. 1

Тираж 100 экз.

Формат 60×84 1/16

Офсетная печать

Заказ №11

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