

На правах рукописи



Шишигин Игорь Николаевич

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ ОХЛАДИТЕЛЯ ВОЗДУХА НА
ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕЛЬТЬЕ ДЛЯ ОЗОНАТОРОВ В
ПЧЕЛОВОДСТВЕ**

Специальность 4.3.2 – Электротехнологии, электрооборудование
и энергоснабжение агропромышленного комплекса

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар – 2023

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 (г. Москва); Бышов Дмитрий Николаевич кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева», кафедра эксплуатации машинно-тракторного парка (г. Рязань)
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (г. Краснодар)

Защита состоится «28» июня 2023 года в 14⁰⁰ 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 «__» _____ 2023 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. Современное пчеловодство все больше применяет электротехнологии и электрооборудование, которые ускоряют работу и облегчают труд пчеловода, что в конечном итоге повышает продуктивность всей пасеки. Например, проводятся профилактические и лечебные мероприятия на пасеке с помощью электроозонаторов и электроактиваторов. С их помощью осуществляется борьба с варроатозом, проходит дезинфекция ульев и сот, а также проводится стимуляция развития пчелиных семей.

Однако применение озонаторов в пчеловодстве столкнулось с проблемой, связанной с подачей в улей озono-воздушной смеси повышенной температуры из-за работы компрессора и самого озонатора. Подача повышенной температуры воздуха в улей приводит к повышенным энергозатратам пчел на вентиляцию и снижение их медопродуктивности. Также высокие температуры воздуха подаваемого в электроозонатор ведут к снижению его производительности и надежности работы. В тоже время применение озона на пасеке оправдано с точки зрения экологичности получаемых продуктов пчеловодства и степени влияния на окружающую среду по сравнению с применяемыми антибиотиками.

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

Степень разработанности темы. Вопросами озонирования и эффективности работы электроозонаторных установок в сельском хозяйстве занимались: В.Ф. Сторчевой, Д.А. Овсянников, С.А. Николаенко, Ю.П. Пичугин, Д.А. Нормов, А.Г. Возмилов, Е.И. Гаврикова, А.Н. Матюнин и другие. Но, несмотря на глубину проводимых исследований и доказанную ими эффективность применения озона, в том числе и в пчеловодстве, установки для его получения требуют совершенствования. Необходимо решение проблемы чрезмерного нагрева разрядного устройства, так как это влечет за собой не только снижение производительности и надежности установки, но и негативные последствия для обрабатываемых объектов.

Большой вклад в развитие установок, облегчающих труд пчеловодов, внесли учёные ФГБОУ ВО РГАТУ имени П.А. Костычева (г. Рязань).

В пчеловодстве возникает проблемная ситуация – несмотря на высокую эффективность антимикробного и лечебного действия озono-воздушной смеси, применение озонаторов ограничивается из-за вынужденного нагревания потока, подаваемого в улей. Существующие системы охлаждения воздуха громоздки, энергоемки и не адаптированы для работы в полевых условиях пчеловодства.

Научная гипотеза. Исследования по использованию элемента Пельтье для предварительного охлаждения воздуха, подаваемого в озонатор с определением параметров и режимов соответствующей конструкции, позволит повысить концентрацию озона в выходном потоке, уменьшит температуру озонозооушной смеси, что улучшит микроклимат пчелиной семьи и сократит ее затраты на воздухообмен.

Целью работы является обоснование параметров и режимов ооладителя воздуха на основе элемента Пельтье для озонаторов, используемых в пчеловодстве для лечебной профилактики пчелиных семей и обработки пчелоинвентаря.

Задачи исследования.

1. Обосновать конструктивно-технологическую схему озонирующей установки с определением необходимой холодопроизводительности ооладителя.

2. Разработать конструкцию ооладителя воздуха для электроозонатора на базе элементов Пельтье и разработать ее геометрическую модель для программного обеспечения.

3. Разработать математическую модель, описывающую тепловые и аэродинамические процессы в ооладителе воздуха на базе элементов Пельтье.

4. В программном комплексе «Comsol Multiphysics» разработать и провести реализацию математической модели ооладения воздуха в ооладителе и обосновать его рациональные параметры и режимы.

5. Изготовить ооладитель воздуха для озонатора на основе элемента Пельтье, провести экспериментальные исследования по сопоставлению опытных данных с результатами моделирования.

6. Провести экспериментальные исследования по влиянию температуры входного воздуха на производительность озонатора.

7. Обосновать экономическую эффективность использования озонирующей установки с охладителем воздуха в пчеловодстве.

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

Объект исследования охладитель воздуха на базе элементов Пельтье для электроозонатора.

Предмет исследования – параметры и режимы работы охладителя на базе элементов Пельтье, зависимости температуры воздуха и концентрации озона на выходе из установки озонирования от ее режимов работы.

Научная новизна работы:

- математическая модель термоэлектрических процессов в охладителе воздуха для электроозонатора;
- зависимости температуры воздуха и концентрации озона на выходе из установки озонирования от ее режимов работы;
- обоснованные параметры и режимы работы охладителя воздуха для электроозонатора.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- математическая модель термоэлектрических процессов, протекающих в охладителе воздуха на базе элементов Пельтье, позволяющая описать изменения выходной температуры в зависимости от параметров и режимов работы;
- зависимости температуры воздуха на выходе из охладителя при различных производительностях компрессора, схемы соединения термоэлектрических модулей (ТЭМ), что дает возможность рекомендовать рациональную конструкцию охладителя и всей установки с минимальным энергопотреблением;
- обоснованные параметры и режимы работы охладителя воздуха для электроозонатора позволяющие увеличить его производительность по озону, снизить температуру озоновооздушной смеси подаваемой в пчелиный улей;
- применение озонирующей установки с охладителем воздуха улучшит микроклимат пчелиной семьи, сократит ее затраты на воздухообмен, простимулирует ее развитие, а также позволит проводить экологичные профилактику и лечение пчел;

- разработанный и изготовленный охладитель имеет малые массогабаритные и низкие энергетические показатели, адаптирован к использованию в полевых условиях.

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.

Апробация работы. Основные положения и выводы диссертации доложены и одобрены на ежегодных научных конференциях факультета энергетики КубГАУ (2020–2022 гг.); на Международном симпозиуме по автоматизации, информации и вычислительной технике (ISAIC 2021) в секции «Системное моделирование и анализ» 03.12.2021 – 06.12.2021 (Online); на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Потенциал и вызовы развития возобновляемой энергетики» 21-23 декабря 2022 г. (г. Невинномысск); на II Международной научно-практической конференции «Science and technology research» 2023 (г. Петрозаводск).

На защиту выносятся:

- математическая модель термоэлектрических процессов, протекающих в охладителе воздуха на базе элементов Пельтье, необходимая для обоснования параметров и режимов работы оборудования;

- зависимости температуры воздуха и концентрации озона на выходе из установки озонирования от ее режимов работы;

- обоснованные параметры и режимы работы охладителя воздуха для электроозонатора;

- результаты экспериментальных исследований и их сопоставление с результатами моделирования, опытные данные по влиянию температуры входного воздуха на производительность озонатора.

Публикации результатов работы. Основное содержание диссертации отражено в 9 печатных работах, в том числе: 5 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК России, 2 статьи в международной базе данных Scopus.

Объем и структура работы. Диссертация содержит введение, 3 главы, заключение, список литературы, включающий 101 наименование, приложения. Текст диссертации изложен на 117 страницах

машинописного текста, включая 18 страниц приложений, содержит 49 рисунков и 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

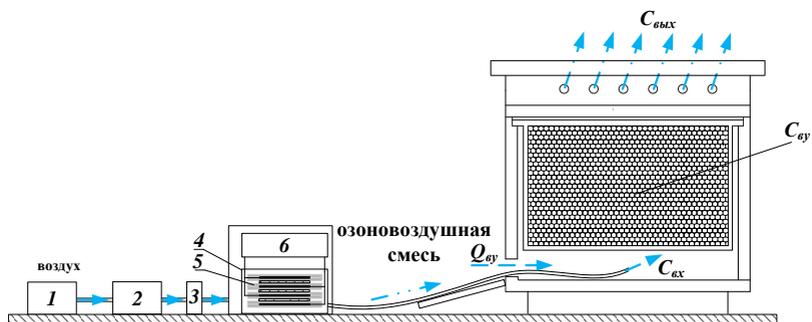
Во введении изложены актуальность исследований, цель работы, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ факторов, влияющих на продуктивность пчелиной семьи. Установлено, что одними из основных таких факторов являются температура и интенсивность появления грибковых, инфекционных и инвазионных заболеваний. В настоящее время пчеловоды все больше уделяют внимание экологически чистым способам и средствам лечения пчел. К немедикаментозным способам лечения и профилактики пчел относятся использование электроактивированных растворов и озонирование. В работах Д.А. Овсянникова, С.А. Николаенко и Д.А. Нормова показана эффективность применения озона в пчеловодстве для стимуляции весеннего развития пчел, а также для профилактики и лечения их бактериальных заболеваний. Одним из причин, сдерживающих применение электроозонаторов пластинчатого типа в пчеловодстве, является их низкая надежность и частые пробои диэлектрических барьеров из-за перегрева. Высокий нагрев связан с принципом действия, так как большая часть потребляемой энергии выделяется в виде тепла. Известно, что температура — это определяющий фактор, который влияет на концентрацию образовавшегося озона. Наивысшая производительность электроозонатора достигается при температуре подаваемого воздуха от 0 до 20°C. Существует способ охлаждения электроозонаторов с использование элементов Пельтье или так называемых термоэлектрических модулей (ТЭМ). Однако эти конструкции охладителей на базе элементов Пельтье для электроозонаторов не имеют определенных параметров и режимов работы для того, чтобы их использовать в пчеловодстве и особенно в полевых условиях.

Сформулирована цель работы и задачи исследования.

Во второй главе представлены математическое и компьютерное моделирование термоэлектрических процессов в охладителе на базе элементов Пельтье. На рисунке 1 приведена конструктивно-

технологическая схема озонирования с предлагаемым охладителем воздуха.



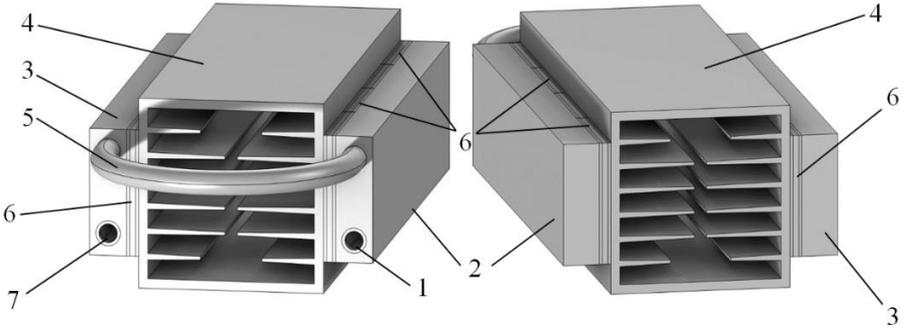
1 – компрессор, 2 – охладитель, 3 – фильтр-влагоотделитель, 4 – корпус электроозонатора, 5 – разрядное устройство, 6 – источник питания электроозонатора
Рисунок 1 – Изображение конструктивно-технологической схемы озонирования ульев с охладителем воздуха

Определена необходимая холодопроизводительность охладителя, так при расходе воздуха $7,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ она составила 50 Вт. В качестве элементов Пельтье приняты 8 модулей типа TEC1-127060-40. Разработана геометрическая модель охладителя (рис.2). Для компьютерного моделирования рассматриваемой геометрической области методом конечных элементов была создана сетка, состоящая из более чем 10 млн. элементов. На «твердых» границах модели, соприкасающихся с потоками воздуха, была построена так называемая погранслоинная сетка для лучшей сходимости гидродинамической задачи.

Для проведения компьютерного моделирования рассматриваемой задачи использовалось программное обеспечение Comsol Multiphysics 6.1. Основными физическими интерфейсами были выбраны: «Heat Transfer in Solids and Fluids» для определения температурных полей и «Turbulent Flow» для определения скоростей воздуха u и давлений p .

При работе охладителя в нем будут протекать следующие физические процессы: теплопередачи включающие в себя теплопроводность через стенки элементов Пельтье и конвективный теплообмен между поверхностью радиаторов и окружающей средой; течение электрического тока через полупроводники p- и n-типа имеющие

определенное электрическое сопротивление, что приводит к электрическому нагреву; термоэлектрический, заключающийся в преодолении электронами потенциального барьера между двумя соединенными разнородными полупроводниками, что проявляется в виде охлаждения или нагрева.



1 – входное воздушное отверстие, 2 – первый «холодный» радиатор, 3 – второй «холодный» радиатор, 4 – «горячий» радиатор, 5 – силиконовый гибкий трубопровод, соединяющий радиаторы 2 и 3, 6 – элементы Пельтье, 7 – выходное воздушное отверстие

Рисунок 2 – Изображение исследуемой геометрической модели

Уравнение сохранения энергии для рассматриваемой установки с учетом теплопроводности и конвекции будет иметь вид:

$$\rho_i C_i \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q_i + \rho_i C_i u_B \nabla T = Q_{\text{общ}}, \quad (1)$$

где ρ_i – плотность i -го элемента охладителя, кг/м^3 ; C_i – удельная теплоемкость i -го элемента охладителя, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; T – температура, К ; q_i – тепловой поток обусловленный теплопроводностью i -го элемента охладителя, Вт/м^2 ; u_B – скорость воздушного потока, м/с ; $Q_{\text{общ}}$ – общее тепловыделение, Вт/м^3 .

Общее тепловыделение складывается из нескольких составляющих, которые представляют собой резистивный нагрев $Q_{\text{дж}}$ (Джоулево тепло) и охлаждение, связанное с эффектом Пельтье $Q_{\text{п}}$:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{дж}} + Q_{\text{п}} = E \cdot i + \nabla V_P \cdot i \quad (2)$$

где E – напряженность электрического поля, В/м ; V_P – коэффициент Пельтье, В ; i – плотность тока через ТЭМ, А/м^2 .

Тепловой поток с учетом термоэлектрического эффекта для каждого из элементов охладителя:

$$q_i = -k_i \nabla T + V_P i, \quad (3)$$

где k_i – коэффициент теплопроводности i -го элемента охладителя, Вт/(м·К).

Для описания турбулентных потоков, использовалась модель Algebraic μ Plus. В основе данной модели лежат уравнения неразрывности и движения Навье-Стокса, в данном случае для сжимаемой среды они будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_B}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_B u_B) = 0 \\ \rho_B \frac{\partial u_B}{\partial t} + \rho_B u_B \nabla u_B = -\nabla p_B + \nabla K + \rho_B g \\ K = (\mu_B + \mu_T) (\nabla u_B + (\nabla u_B)^T) - \frac{2}{3} (\mu_B + \mu_T) (\nabla u_B) I \end{cases}, \quad (4)$$

где μ_B – коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с; p_B – давление воздуха, Па; I – единичный вектор; g – ускорение свободного падения, м/с²; μ_T – коэффициент турбулентной вязкости, Па·с.

Для определения тепловых потоков, связанных с теплопроводностью q_i вычислялись коэффициенты теплоотдачи h_i , которые зависят от геометрического расположения и формы каждой поверхности модели. Так на горизонтальных границах охладителя, обдуваемых воздухом сверху и снизу коэффициент теплоотдачи, определится по формуле, имеющейся в ПО:

$$h_{ГСВ} = \begin{cases} \frac{k_B}{L} 0,54 Ra_L^{1/4} & \text{если } T_{СТ} > T_{ВН} \text{ и } 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7 \\ \frac{k_B}{L} 0,15 Ra_L^{1/3} & \text{если } T_{СТ} > T_{ВН} \text{ и } 10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11} \\ \frac{k_B}{L} 0,27 Ra_L^{1/4} & \text{если } T_{СТ} \leq T_{ВН} \text{ и } 10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10} \end{cases} \quad (5)$$

где k_B – теплопроводность воздуха, Вт/(м·°С); L – характерная длина плоскости, на которой задается граничное условие (площадь поверхности стенки, деленная на ее периметр), м; Ra_L – число Рэлея связанное с характерной длиной L .

С учетом полученных уравнений и рассмотренных начальных и граничных условий, математическая модель теплофизических процессов в ПО Comsol приняла вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_i C_i \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q_i + \rho_i C_i u_B \nabla T = Q_{ОБЩ} \\ Q_{ОБЩ} = E \cdot i + \nabla V_P \cdot i \\ q_i = -k_i \nabla T + V_P i \\ i = -\sigma_i (\nabla V + S \nabla T) \\ \frac{\partial \rho_B}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_B u_B) = 0 \\ \rho_B \frac{\partial u_B}{\partial t} + \rho_B u_B \nabla u_B = -\nabla p_B + \nabla K + \rho_B g \\ K = (\mu_B + \mu_T) \left(\nabla u_B + (\nabla u_B)^T - \frac{2}{3} (\mu_B + \mu_T) (\nabla u_B) I \right) \\ q_{CTi} = h_i (T_{BH} - T_{CT}) \\ h_i = f(k_B, L_i, Ra_L, Pr, \mu_B, C_B) \\ q_{BX} = \rho_B \Delta H u_B n \\ \Delta H = \int_{T_{BX}}^T C_B dT \end{array} \right. \quad (6)$$

где h_i – коэффициенты теплоотдачи i -х поверхностей охладителя; q_{ex} – граничное условие, определяющее тепловой поток, который учитывает энергию, вносимую потоком воздуха; ΔH – изменение энтальпии; n – нормальный вектор.

В результате реализаций полученных геометрической и математических моделей в интерфейсах ПО Comsol Multiphysics, были получены поля распределения температур в рассматриваемой геометрической области (рис. 3).

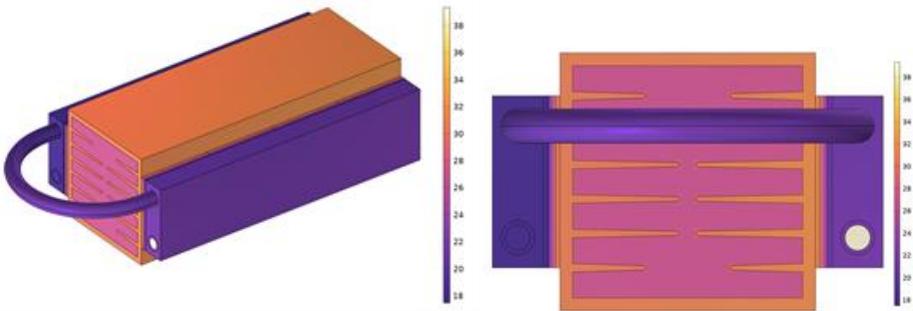


Рисунок 3 – Изображения распределения температур на поверхности охладителя при производительности компрессора 70 л/мин

При разной производительности компрессора температура воздуха на выходе из охладителя изменяется слабо. Так, в выходном

сечении через 1 час работы, при производительности компрессора 70 л/мин температура составляет 17,8°C (Рис. 4), а при производительности компрессора 125 л/мин – 18,6°C

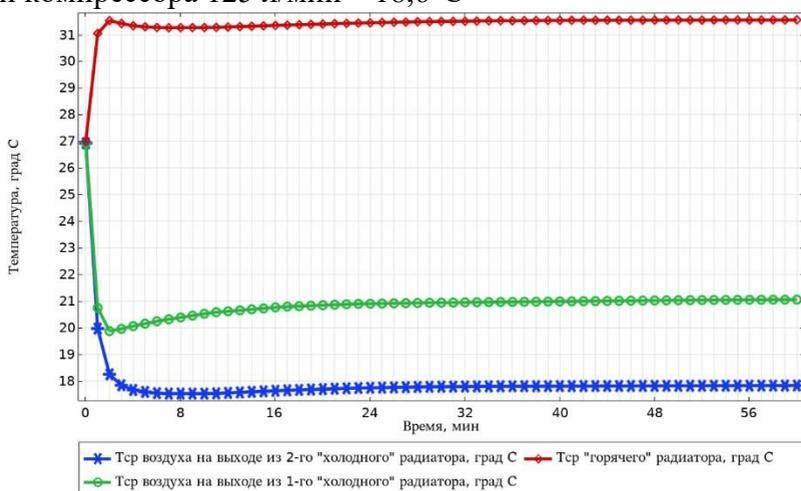


Рисунок 4 – Графики изменения средних температур в охладителе с течением времени при производительности компрессора равной 70 л/мин

При термоэлектрическом эффекте часть потребляемой энергии идет на получение холода, а часть на разогрев внутренних переходов элемента Пельтье. При этом энергия на охлаждение пропорциональна первой степени тока, а на нагрев – квадрату тока. Так как охладитель включал 8 элементов ТЭМ, то проведена оптимизация их схем соединения по минимальному энергопотреблению с получением максимальной разницы температур входного и выходного воздуха. Максимальная потребляемая мощность (55 Вт) получена при последовательном соединении четырех элементов на одном радиаторе и при парном последовательном соединении на втором радиаторе (рис. 5, а). Среднее значение потребляемой мощности (22 Вт) имелось при последовательном соединении по 4 элемента на каждом радиаторе (рис. 5, б). Минимальное потребление энергии (5,5 Вт) получено при последовательном соединении всех восьми ТЭМ охладителя и последующим включением в общую питающую сеть постоянного тока (рис. 5, в).

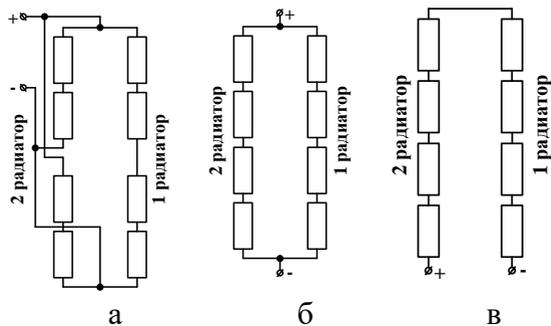


Рисунок 5 – Варианты соединения ТЭМ в проводимом исследовании

Наиболее экономичные охладители получаются при соединении элементов по второму и третьему вариантам. При втором варианте соединения ТЭМ, через 1 час работы температура воздуха на выходе (на входе температура воздуха 42°C) установки составила 22,8°C, а при третьем 25,4 °C. При этом температура горячего радиатора, ранее всегда державшаяся на уровне 30-32°C снизилась до 29°C (рис. 6).

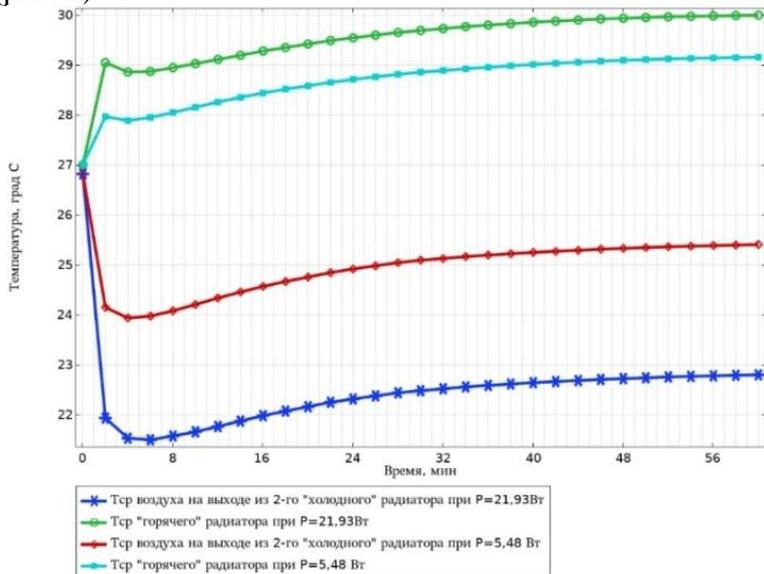


Рисунок 6 – Графики изменения средних температур в охладителе с течением времени при производительности компрессора равной 125 л/мин и при разных соединениях ТЭМ

Разница по изменению температуры ΔT между рассматриваемыми вариантами соединения ТЭМ составила $2,6^{\circ}\text{C}$ (рис. 7) при гораздо большей разнице по потребляемой мощности.

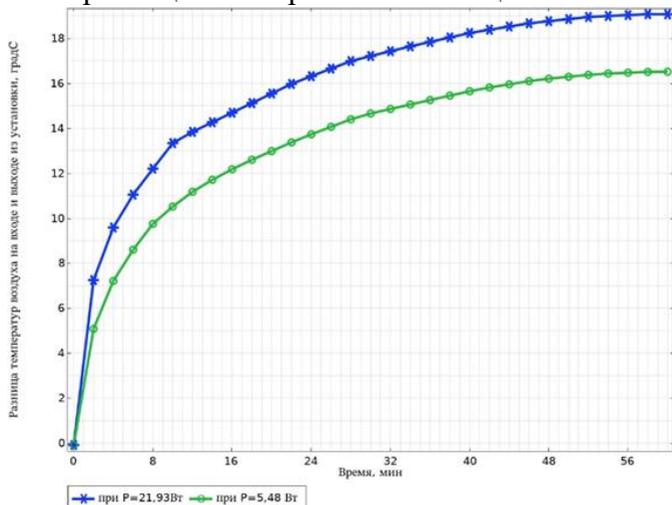


Рисунок 7 – Графики изменения во времени ΔT на входе и выходе из охладителя при подключении ТЭМ согласно второму и третьему вариантам

В связи с инерционностью процесса нагрева и охлаждения разрядного устройства электроозонатора можно рекомендовать 2 режима работы охладителя: постоянный и повторно-кратковременный. Повторно-кратковременный режим можно использовать для еще большего сокращения потребления электроэнергии установкой, например, в случаях обработки большого количества ульев. Минимальный период паузы может быть определен с помощью моделирования. Так на рисунке 8 показан результат компьютерной обработки модели с ТЭМ, соединенными согласно второму варианту, в котором отключение охладителя осуществлялось на 5-й минуте. По графикам видно, что через 2-3 минуты температура на выходе охладителя становится равной входной. Таким образом, данное время можно принять за интервал минимальной паузы при работе установки в повторно-кратковременном режиме. Период работающего охладителя нужно установить более 5-6 минут.

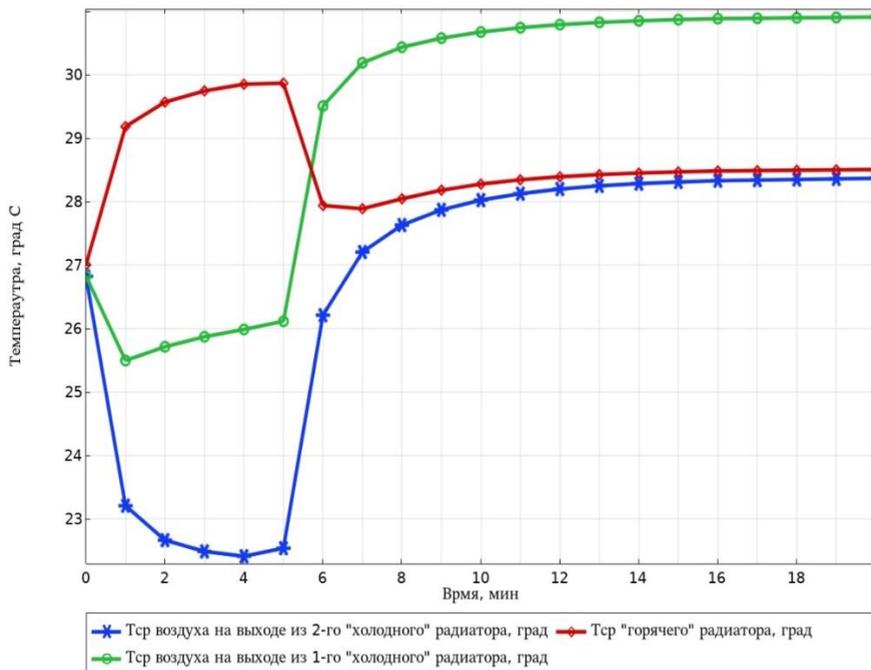
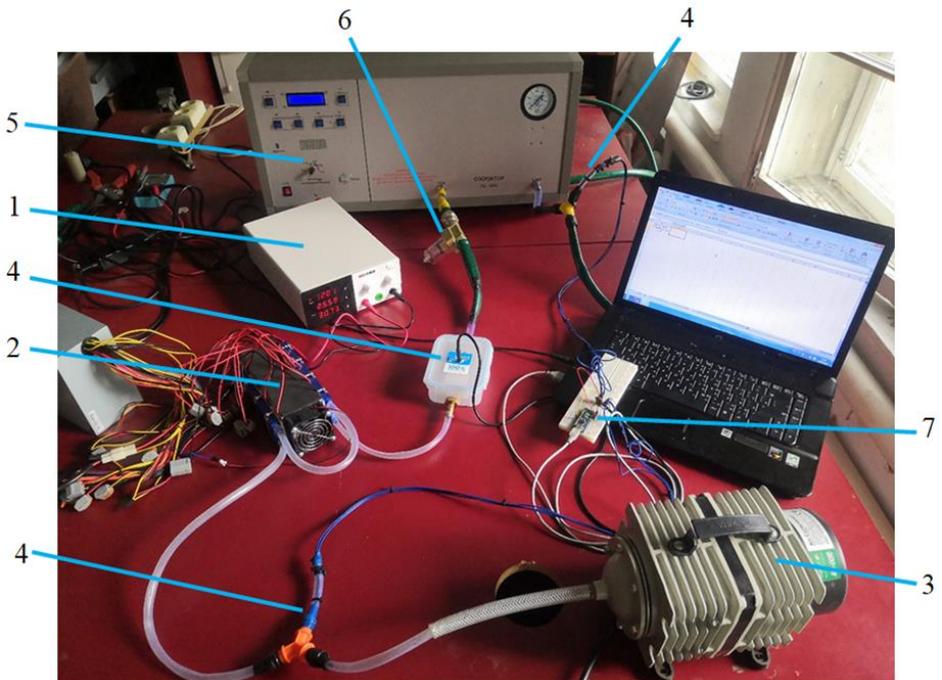


Рисунок 8 – Графики изменения средних температур в охладителе с течением времени при производительности компрессора равной 125 л/мин, соединении ТЭМ по второму варианту и их отключении на 5-й минуте

В третьей главе представлены экспериментальные исследования. Для проведения экспериментов изготовлен охладитель и собрана установка озонирования, фотография которой представлена на рисунке 9. Экспериментальные исследования проводились в 2 этапа. На первом этапе было проведено сравнение результатов реализации модели с экспериментальными. Размеры охладителя соответствуют созданной ранее геометрической модели. Для измерения температуры окружающего воздуха, а также на входе и выходе из установки (охладителя или электроозонатора) использовались цифровые датчики температуры DS18B20. Данные поступали в автоматическом режиме на ноутбук с помощью микроконтроллерной платформы Arduino и макроса для программы Excel – PLX-DAQ.



1 – лабораторный блок питания, 2 – охладитель, 3 – один из двух используемых в исследовании компрессоров, 4 – места установки датчиков температуры DS18B20, 5 – электроозонатор, 6 – фильтр-влагоотделитель, 7 – платформа Arduino

Рисунок 9 – Фотография экспериментальной установки

На рисунке 10 показаны результаты сравнения данных при моделировании и экспериментальных значений по температурам воздуха на выходе из охладителя. Анализировался вариант при последовательном соединении по два ТЭМ (четыре пары) к источнику тока с обеих сторон охладителя и при разной производительности компрессора. Так при производительности компрессора 70 л/мин наибольшая разница между модельными и экспериментальными данными составила 3,4%, а при 125 л/мин она не превышала 1,3%, что говорит о хорошей сходимости полученных результатов.

Во всех случаях при сравнении теоретических и экспериментальных данных t -критерий Стьюдента, полученный в результате расчета, был меньше его критического значения.

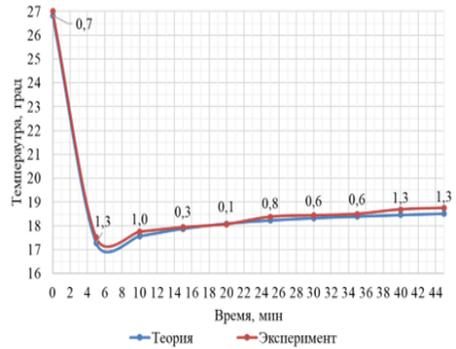
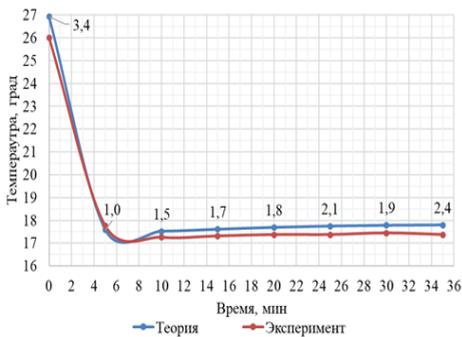


Рисунок 10 – Графики сравнения теоретических и экспериментальных данных при производительностях компрессора 70 л/мин (слева) и 125 л/мин (справа)

На втором этапе экспериментов проводились исследования совместной работы охладителя с электроозонатором. На рисунке 11 показаны графики по результатам исследований работы озонирующей установки в повторно-кратковременном режиме. Включение разработанного охладителя происходило в момент нагрева разрядного устройства озонатора до критической температуры (32–34°C). Затем включался охладитель и в течение 32 минут работал, в последующем отключался на 8 минут до достижения опять критического значения температуры разрядного устройства. Температура окружающего воздуха в эксперименте была равна 19,3°C. Однако летом температура окружающего воздуха может быть свыше 33°C, тогда температура озоновоздушной смеси может составить более 46°C. Как видно из рисунка 11 концентрация озона при включении охладителя резко выросла с 56,1 мг/м³ до 64,9 мг/м³ (на 8,8 мг/м³ или на 15,7%). Температура воздуха на входе в электроозонатор с момента начала работы охладителя и до его отключения снизилась с 34,5°C до 13,44°C (на 21,1°C). Понижение температуры воздуха на 1°C позволило увеличить концентрацию озона на выходе из электроозонатора на 0,4 мг/м³. Далее на 73 минуте охладитель вновь был выключен, что привело к резкому падению концентрации озона с 56,1 мг/м³ до 45,2 мг/м³ (на 10,9 мг/м³ или на 19,4%). Включение охладителя вновь на 81 минуте привело к увеличению концентрации озона с 45,6 мг/м³ до 56,7 мг/м³ (на 11,1 мг/м³ или на 19,6%). При этом в течении

последующих 9 минут его работы температура озонозвоздушной смеси практически не изменялась (31,5°С – 31,8°С).

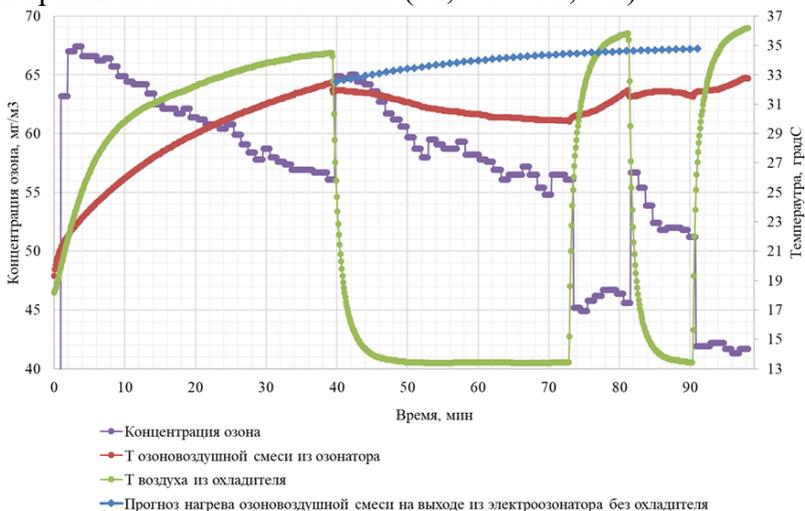


Рисунок 11 – Графики изменения температуры воздуха на выходе из охладителя (зеленый график), температуры озонозвоздушной смеси на выходе из электроозонатора (красный график), концентрации озона (фиолетовый график), статистического прогноза повышения температуры воздуха без охладителя (синий график)

Полученные результаты позволяют сделать вывод об адекватности разработанной модели термоэлектрических процессов в охладителе, а также позволяют рекомендовать следующие рациональные параметры и режимы его работы: 8 ТЭМ типа ТЕС1-127060-40, вентилятор на 12 В производительностью 36 м³/ч, 1 ребристый и 2 канальных радиатора длиной 16 см и шириной не менее 4 см, производительность компрессора 125 м³/ч и более, 2 режима работы постоянный и повторно-кратковременный. Во втором режиме работа идет по следующему алгоритму: включение, выход на установившейся режим и работа в течение 6-9 минут, отключение охладителя – пауза 2-8 минут и т.д.

Расчет стоимости изготовления макетного варианта установки в единичном экземпляре показал, что основные затраты будут идти на стадию исследования и разработки образца, которые составили 586,48 тыс. рублей. При изготовлении малой партии установок

отпускная цена составит, с учетом накладных расходов 100 тыс. руб. Определена экономическая эффективность внедрения озонирующей установки с охладителем на пасеки в 50 ульев. Использование такой установки приведет к получению дополнительного дохода за счет увеличения массы рабочих пчел в ульях, что даст возможность увеличить количество качек в рабочий сезон и повысить медопродуктивность пчелиных семей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Обоснована конструктивно-технологическая схема озонирующей установки, определена требуемая холодопроизводительность охладителя, которая составила 50 Вт, при подаче компрессора 7,5 м³/ч для понижения температуры входного воздуха на 20°C.

2. Разработана конструкция и геометрическая модель охладителя воздуха на основе элементов Пельтье для ПО Comsol, состоящая из: 8-ми ТЭМ типа TEC1-127060-40, вентилятора на 12 В с производительностью 36 м³/ч, обдувающего радиатор, который соприкасается с горячими сторонами всех ТЭМ, 2-х последовательно соединенных канальных радиаторов, каждый из которых соприкасается с холодными сторонами 4-х ТЭМ.

3. Разработана математическая модель термоэлектрических процессов в охладителе на основе уравнения теплового баланса с учетом теплопроводности, конвекции и термоэлектрического эффекта на базе элементов Пельтье, включающая в себя начальные и граничные условия, в которых заданы значения исследуемых параметров на входных и выходных границах исследуемой геометрической области.

4. Реализации модели в ПО Comsol Multiphysics показали, что расход воздуха через охладитель в таких диапазонах не оказывает существенного влияния на эффективность его охлаждения. Например, увеличение производительности компрессора в 1,8 раз приводит к снижению получаемой разницы температур между входным и выходным воздухом ΔT с 23,3°C до 23,2°C.

5. Изменяя схему соединений 8 элементов ТЭМ можно получить наиболее рациональный режим работы охладителя. Максимальная потребляемая мощность (55 Вт) получена при последовательном

соединении четырех элементов на одном радиаторе и при парном последовательном соединении четырех элементов на втором радиаторе. Среднее значение потребляемой мощности (22 Вт) имелось при последовательном соединении по 4 элемента на каждом радиаторе. Минимальное потребление энергии (5,5 Вт) получено при последовательном соединении всех восьми ТЭМ охладителя и последующим включением в общую питающую сеть постоянного тока. Наиболее эффективный охладитель получен при последовательном соединении всех ТЭМ: через 1 час работы разница температур между входным и выходным воздухом ΔT составила 16,5°C.

6. Экспериментальные исследования по подтверждению теоретических положений процесса охлаждения воздуха подаваемого в электроозонатор показали следующее: относительная ошибка по температурным показателям не более 6,8%, адекватность модели оценена по t-критерию Стьюдента при уровне значимости $p = 0,01$ подтвердила отсутствие статистических различий между теоретическими и экспериментальными данными. Относительная ошибка по мощностям, потребляемым установкой при моделировании и в эксперименте, составила не более 8%. При работе электроозонирующей установки с охладителем выходная концентрация озона увеличивается на 9% – 20% по сравнению с отключенным охладителем, что позволяет сократить время обработки пчелиных ульев с 30 минут до 19 минут.

7. Установка может работать в двух режимах: постоянном и повторно-кратковременном. Постоянный режим с минимальной и средней мощностью можно рекомендовать для пасек с небольшим количеством пчелиных ульев и ограниченной мощностью источника тока. Работа в повторно-кратковременном режиме может происходить в следующей последовательности: включение, выход на установившейся режим и работа в течении 6-9 минут, отключение охладителя – пауза 2-8 минут.

8. Экономическая эффективность для пасеки в 50 ульев в виде ЧДД за 5 лет использования оборудования по озонированию составляет 4 миллиона 553 тысячи рублей. Дополнительный доход получен за счет увеличения силы пчелиных семей, что приводит к увеличению количества качек за сезон и повышению медопродуктивности пасеки.

Рекомендации производству

В хозяйствах, занимающихся пчеловодством, результаты исследования могут быть использованы для проведения профилактических и лечебных мероприятий на пасеке. В весеннее время использование озонирующей установки позволит провести стимуляцию развития пчелиных семей и нарастить их силу к ранним медосборам. Предлагаемая озонирующая установка с охладителем может работать в полевых условиях, получая энергию от аккумуляторных батарей. Небольшие предприятия, изготавливающие пчелоинвентарь могут начать мелкосерийное производство охладителей и озонирующих установок.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Используя результаты моделирования и экспериментов, можно получать мультифизические модели охладителей с большим количеством термоэлектрических модулей с различными комбинациями их соединений. Полученные результаты, возможно, будет использовать при разработке озонаторов со встроенными охладителями на базе элементов Пельтье. Дальнейшую модернизацию озонирующей установки можно провести в части разработки комплекса для профилактики большего количества пчелиных ульев (более 100 штук) для частных и промышленных пасек. Комплекс будет иметь несколько озонаторов и охладителей.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ

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

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

2. Shishigin I.N. Modeling beehive microclimate at the end of wintering / S.V. Oskin, D.A. Ovsyannikov, I.N. Shishigin // Biophysics. – 2022. – Vol. 67., № 1. p. 85-91.

- в изданиях, рекомендованных ВАК:

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

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

5. Шишигин, И.Н. Агрегация пчел в улье при больших колебаниях температуры воздуха / С.В. Оськин, Д.С. Цокур, И.Н. Шишигин // Сельский механизатор. – 2021. – № 1. – С. 16-17.

6. Шишигин, И.Н. Моделирование водяной системы охлаждения воздуха для электроозонатора при лечении пчел / И.Н. Шишигин, С.В. Оськин // Сельский механизатор. – 2022. – № 10. – С. 22-23.

7. Шишигин, И.Н. Оборудование для повышения эффективности пчеловодства АПК / С.В. Оськин, Д.С. Цокур, И.Н. Шишигин, С.М. Федак // АПК России. – 2023. – Т. 30, № 1. – С. 53-58.

- в прочих изданиях:

8. Шишигин, И.Н. Охладитель воздуха для электроозонатора на базе элементов Пельтье / И.Н. Шишигин, Д.С. Цокур // В сборнике: Потенциал и вызовы развития возобновляемой энергетики. Сборник научных статей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Ставрополь. – 2023. – С. 31-34.

9. Шишигин, И.Н. Разработка охладителя воздуха для снижения нагрева электроозонатора на базе элементов Пельтье / И.Н. Шишигин // Сборник научных статей по материалам Международной научно-практической конференции Science and technology research - 2023, Петрозаводск. – МЦНП «Новая наука», 2023. – С. 20-24.

Подписано к печати 20.04. 2023

Бумага офсетная

Уч.-изд. л. 1

Тираж 100 экз.

Формат 60×84 1/16

Офсетная печать

Заказ №

Отпечатано в типографии ООО «Крон»
350004, г. Краснодар, ул. Алма-Атинская, 99