

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ  
АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА / ELECTROTECHNOLOGY, ELECTRICAL EQUIPMENT AND  
POWER SUPPLY OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.36>

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОЗОНАТОРА ДЛЯ ОЗОНИРОВАНИЯ УЛЬЕВ

Научная статья

Оськин С.В.<sup>1</sup>, Цокур Д.С.<sup>2,\*</sup>, Лоза А.<sup>3</sup>, Шишигин И.Н.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0001-7274-5229;

<sup>2</sup>ORCID : 0000-0003-3291-810X;

<sup>1,2,3,4</sup>Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (dmitry\_tsokur[at]mail.ru)

**Аннотация**

Основная масса пчелосемей находится в личных подсобных хозяйствах. Необходимо помочь пчеловодам в их борьбе с основными заболеваниями пчелиных семей. Применение химических препаратов приводит к адаптации болезнетворных микроорганизмов и накоплению в продуктах пчеловодства опасных веществ. Наука и практика продолжают поиски новых экологически чистых способов лечения пчелосемей. Много подобных исследований проводится в Кубанском ГАУ. Например, использование озонаторов позволяет проводить профилактику заболеваний и стимуляцию развития пчелиных семей. Требуется продолжение исследований по повышению эффективности использования озонаторов в пчеловодстве. Для этого нужно провести моделирование основных физических процессов, протекающих в озонаторе. Была разработана математическая модель основных процессов в озонаторе и в результате моделирования в ПО Comsol Multiphysics были установлены рациональные параметры и режимы работы. Также установлено, что в случае подключения нескольких ульев к выходным патрубкам наблюдается неравномерность выходных концентраций озона – практически в два раза. Рекомендуется дополнительная установка какой-либо конструкции для обеспечения необходимой равномерности подачи озона в ульи.

**Ключевые слова:** пчеловодство, озонирование, профилактика, ульи, электрооборудование.

SUBSTANTIATION OF OZONATOR PARAMETERS FOR HIVE OZONIZATION

Research article

Oskin S.V.<sup>1</sup>, Tsokur D.S.<sup>2,\*</sup>, Loza A.B.<sup>3</sup>, Shishigin I.N.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0001-7274-5229;

<sup>2</sup>ORCID : 0000-0003-3291-810X;

<sup>1,2,3,4</sup>Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation

\* Corresponding author (dmitry\_tsokur[at]mail.ru)

**Abstract**

The majority of bee families are in private subsidiary farms. It is necessary to help beekeepers in their fight against the main diseases of bee populations. The use of chemical drugs leads to the adaptation of pathogens and accumulation of dangerous substances in beekeeping products. Science and practice continue to search for new environmentally friendly ways to treat bee families. A lot of such research is carried out in Kuban SAU. For example, the use of ozonators makes it possible to prevent diseases and stimulate the development of bee families. It is necessary to continue research on increasing the efficiency of ozone use in beekeeping. For this objective, it is necessary to carry out modelling of the main physical processes occurring in the ozonator. A mathematical model of the main processes in the ozonator was developed and as a result of modelling in Comsol Multiphysics software rational parameters and modes of operation were established. It has also been found out that in case of connection of several hives to the output spigots, non-uniformity of ozone output concentrations is observed – practically twice. Additional installation of some structure is recommended to ensure the required uniformity of ozone supply to the hives.

**Keywords:** beekeeping, ozonization, prevention, hives, electrical equipment.

**Введение**

Сегодня пчеловодство в России переносит сложные времена, и количество пчелиных семей продолжает сокращаться. На Кубани в 2023 году проходил круглый стол «Правоприменение и развитие законодательного регулирования пчеловодства в Российской Федерации» где отмечалось, что количество пчелосемей в России за последние десятилетия снизилось в три раза [1]. Сегодня известно, что большая часть пчелиных ульев находится в личных подсобных хозяйствах. Сокращение пчел влияет на производство меда и других продуктов пчеловодства. Также нужно отметить, что определяющая роль пчеловодства заключается не в получении меда, а в опылении отдельных сельскохозяйственных культур.

Для успешного и продуктивного ведения пчеловодства необходимо постоянно следить за здоровьем пчелиных семей. На сегодня наиболее распространёнными болезнями пчел являются аскосфероз, нозематоз, варроатоз, и др. Пчеловоды опасаются распространения новой разновидности варроатоза – клеща Троби, с которым еще не найдены радикальные способы борьбы.

Сейчас большинство болезней пчел, пчеловоды лечат определенными антибиотиками. Постоянное применение антибиотиков в дальнейшем приведет к снижению их способности воздействовать на пораженные семьи, что связано с привыканием к ним болезнетворных организмов. Конечно, это вынуждает пчеловодов в первую очередь увеличивать дозу данных лекарств, что может уже негативно действовать и на самого пчеловода. Также в пчеловодстве замечено, что антибиотики попадают в продукты пчеловодства, что снижает их потребительские качества [2]. В связи с этим ученые и пчеловоды продолжают поиск экологически чистых способов лечения пчелиных семей. К таким экологичным способам относится озонирование. Озон представляет собой сильный дезинфектант и способен разрушать болезнетворные микроорганизмы путем их окисления [3], [4]. Значительный вклад в разработку и внедрение озонаторов в пчеловодстве внесли ученые Кубанского ГАУ [4]. Так, ими установлены следующие параметры для профилактики и лечения аскофероза: концентрация озона  $250 \text{ мг/м}^3$ , экспозиция 1 час; при значительном поражении семьи – концентрация газа увеличивается 2 раза –  $500 \text{ мг/м}^3$  с экспозицией 1 час. Овсянниковым Д.А. и его учениками установлены параметры и режимы работы озонирующих установок для профилактики и лечения нозематоза, варроатоза, и даже для уничтожения восковой моли. Эти ученые предложили обеззараживать соторамки, пораженные нозематозом озоном с концентрацией  $100\text{--}400 \text{ мг/м}^3$  в течение 12 часов [5]. С самой проблемной болезнью – варроатозом можно бороться озонированием если подавать в улей его концентрацию  $500\text{--}2000 \text{ мг/м}^3$  с продолжительностью работы от 20 до 120 мин [6].

В качестве озонаторов ученые Кубанского ГАУ используют конструкции разрядных устройств пластинчатого типа. Такие конструкции состоят из электродов и диэлектрических барьеров с воздушными промежутками (рис.1).

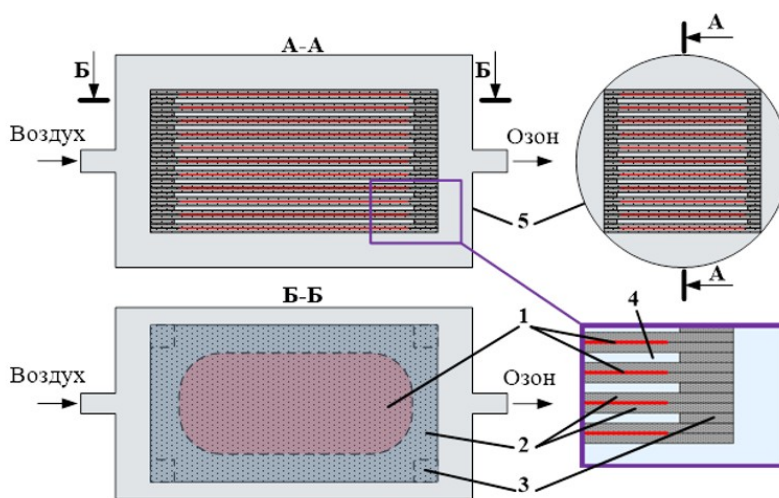


Рисунок 1 - Вид озонатора пластинчатого типа:

1 – проводящие электроды; 2 – диэлектрические барьеры; 3 – непроводящие вставки; 4 – разрядный зазор; 5 – корпус  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.36.1>

Цель исследования: разработать математическую модель, описывающую основные процессы в озонаторе и реализовать ее в ПО Comsol Multiphysics с получением рациональных параметров и режимов работы.

#### Методы и принципы исследования

Моделирование большинства процессов в озонаторе является сложной и трудоемкой задачей, так как необходимо анализировать отдельные составляющие: протекание электрического тока в газах, возникающие при этом химические реакции, движение потока газа, массоперенос образующихся веществ и т.д. Решение таких задач возможно в ПО Comsol Multiphysics. На рис. 2 показана конструкция разрядного устройства озонатора пластинчатого типа.

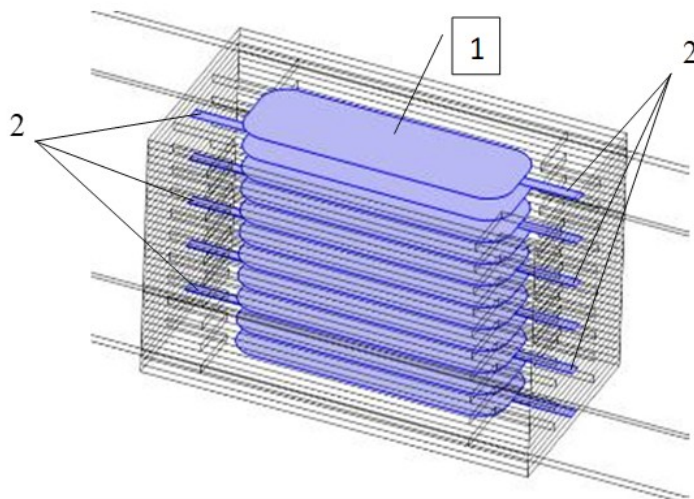
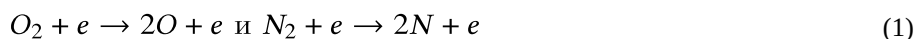


Рисунок 2 - Изображение разрядного устройства:  
1 – электроды; 2 – контакты для подключения электродов к источнику питания  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.36.2>

В большинстве исследований [8] принимается допущение, что в случае воздуха, как исходного газа для получения озона, при рассмотрении возникающих химических реакций можно рассматривать только реакции с кислородом и азотом:



В результате взаимодействия образованных атомов кислорода и азота с их молекулами образуется озон:



Массовые доли отдельных химических составляющих в соответствии с выражением [9] могут быть найдены следующим образом:

$$\rho \frac{\partial c_i}{\partial t} + \rho(v \cdot \nabla)c_i = R_i \quad (4)$$

где:

$\rho$  – плотность смеси, кг/м<sup>3</sup>;

$c_i$  – массовая доля  $i$ -го вещества, о.е.;

$v$  – скорость смеси, м/с;

$R_i$  – скорость химической реакции для  $i$ -го вещества, кг/(м<sup>3</sup>·с).

Транспортные свойства электронов можно установить на основании функции распределения энергий электронов (ФРЭЭ), которая задаётся одним из способов: по Максвеллу, Друивестейну, уравнению Больцмана. Установлено [10], что наилучшую сходимость при моделировании численными методами имеет ФРЭЭ по Максвеллу:

$$f(\varepsilon) = \phi^{-3/2} \beta_1 \exp(-(\varepsilon \beta_2 / \phi)), \quad (5)$$

где:

$\beta_1 = \Gamma(5/2g)^{3/2} \Gamma(3/2g)^{-5/2}$  и  $\beta_2 = \Gamma(5/2g) \Gamma(3/2g)^{-1}$ ;

$\varepsilon$  – энергия электрона, эВ;

$\phi$  – средняя энергия электрона, эВ;

$g$  – коэффициент равный единице;

$\Gamma$  – неполная гамма-функция.

Описать распределения электронов в разрядном промежутке возможно с помощью уравнения Больцмана, которое допускает движения электронов под действием внешних сил, в качестве которых выступают электрическое поле и воздушные потоки [9]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \left( \frac{\partial \Gamma_e}{\partial x} + \frac{\partial \Gamma_e}{\partial y} + \frac{\partial \Gamma_e}{\partial z} \right) = - \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) n_e, \quad (6)$$

где:

$n_e$  – плотность электронов, 1/м<sup>3</sup>;

$\Gamma_e$  – поток электронов, 1/(м<sup>2</sup>·с).

Поток электронов  $\Gamma_e$  под действием электрического поля можно описать следующим выражением:

$$\Gamma_e = -(\mu_e \cdot E)n_e - D_e \cdot \left( \frac{\partial n_e}{\partial x} + \frac{\partial n_e}{\partial y} + \frac{\partial n_e}{\partial z} \right), \quad (7)$$

где:

$\mu_e$  – подвижность электронов, м<sup>2</sup>/(В·с);

$E$  – напряженность электрического поля, В/м;

$U$  – напряжение на электродах, В;

$D_e$  – диффузия электронов, м<sup>2</sup>/с.

Параметр подвижности электронов  $\mu_e$  определяется в соответствии с выражением:  $\mu_e = \mu_e \cdot N_n / N_n$ , где  $N_n$  – число Лошмидта, 1/м<sup>3</sup> [11]:

$$N_n = \frac{p}{k_B \cdot T} \quad (8)$$

где:

$p$  – давление, Па;

$k_B$  – постоянная Больцмана,  $1,38 \cdot 10^{-23}$ , Дж/К;

$T$  – температура, К.

Напряженность электрического поля описывается следующим уравнением:

$$E = -\left( \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial U}{\partial z} \right) \text{ и } \nabla(\epsilon_0 \epsilon_d E) = \rho_V \quad (9)$$

где:

$\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $8,8542 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;

$\epsilon_d$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды, о.е.;

$\rho_V$  – объемная плотность заряда, Кл/м<sup>3</sup>, ( $\rho_V = -(n_e/N_A) \cdot F$ , где  $N_A$  – число Авагадро, 1/моль;  $F$  – постоянная Фарадея, Кл/моль).

Принимаем, что движение воздушной смеси в установке будет турбулентным и расчеты будут проводиться с помощью модели Algebraic uPlus (данная модель чаще всего используется для описания процессов охлаждения электрооборудования), которая основана на уравнениях Навье-Стокса и для данной среды может быть представлена как:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v \nabla v = -\nabla p + \nabla K + \rho g \\ K = (\mu + \mu_T)(\nabla v + (\nabla v)^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla v)I \end{cases}, \quad (10)$$

где:

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с;

$p$  – давление воздуха, Па;

$I$  – единичный вектор;

$g$  – ускорение свободного падения;

$\mu_T$  – турбулентная вязкость, Па·с.

Процессы, описанные выше, соответствуют только области разрядных промежутков озонатора. После выхода из разрядника в воздушной области остальной установки массоперенос веществ будет связан с процессами диффузии и конвекции [12]:

$$\frac{\partial c_{O_3 \text{ diluted}}}{\partial t} + \nabla J_{O_3} + v \nabla c_{O_3 \text{ diluted}} = R_{O_3} \quad (11)$$

где:

$c_{O_3 \text{ diluted}}$  – концентрация озона за разрядными промежутками, моль/м<sup>3</sup>;

$J_{O_3}$  – плотность потока озона, вызванного диффузией, моль/(м<sup>2</sup>·с);

$R_{O_3}$  – скорость реакции, моль/(м<sup>3</sup>·с).

Плотность потока озона можно определить через уравнение Фика:

$$J_{O_3} = -D \nabla c_{O_3}, \quad (12)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии озона, 0,0000157 м<sup>2</sup>/с.

Для моделирования данных процессов в ПО Comsol Multiphysics были использованы следующие физические интерфейсы: «Plasma», «Turbulent Flow», «Transport of Diluted Species».

В качестве начальных условий в физическом интерфейсе «Plasma» были приняты концентрации поступающих в разрядные промежутки кислорода  $c_{O_2}$  и азота  $c_{N_2}$  необходимые для расчета концентраций озона  $c_{O_3}$  в соответствии с (1) – (4). Так как в компьютерной модели концентрации озона  $c_{O_3}$  и  $c_{O_3 \text{ diluted}}$  определяются в двух разных доменах, то для их сопряжения в интерфейсе «Transport of Diluted Species» на выходных плоскостях разрядного устройства было задано граничное условие (ГУ)  $c_{O_3} = c_{O_3 \text{ diluted}}$ . Таким образом, концентрации озона  $c_{O_3}$ , определяемые внутри разрядных промежутков, являлись начальными значениями для вычислений концентраций озона  $c_{O_3 \text{ diluted}}$  в остальной воздушной области установки. На входе в озонатор, задавалось ГУ «Fan» учитывающее функциональную связь давления  $p$  от производительности компрессора  $Q_k$ . В соответствии с [13] ГУ «Fan» можно описать следующим образом:

$$n^T (-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I n = -p_{in} \quad (13)$$

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

где:

$n$  – вектор нормали к задаваемой поверхности;

$p_0$  – давление на входе в установку, Па.

Граничное условие «Outlet», которое учитывает выход смеси из озонатора задавалось уравнением [13]:

$$n(-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)) = -p_{out} n. \quad (14)$$

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

На основании полученных уравнений, описывающих основные процессы в озонаторе и принятых граничных условий, компьютерную математическую модель процессов в озонаторе можно представить в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{\partial c_i}{\partial t} + \rho(v \cdot \nabla)c_i = R_i \\ f(\varepsilon) = \varphi^{-3/2} \beta_1 \exp(-\varepsilon \beta_2 / \varphi) \\ \frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \left( \frac{\partial \Gamma_e}{\partial x} + \frac{\partial \Gamma_e}{\partial y} + \frac{\partial \Gamma_e}{\partial z} \right) = - \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) n_e \\ E = - \left( \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial U}{\partial z} \right), \nabla(\varepsilon_0 \varepsilon_d E) = \rho_V \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v \nabla v = -\nabla p + \nabla K + \rho g \\ \frac{\partial c_{O_3}}{\partial t} + \nabla J_{O_3} + v \nabla c_{O_3} = R_{O_3} \\ n^T (-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I n = -p_{in} \\ p_{in} \geq p = f(Q_k) \\ n(-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)) = -p_{out} n \end{array} \right. \quad (15)$$

Для качественной реализации полученной модели, в ПО Comsol Multiphysics построена сетка на соответствующей геометрии (рис. 3). Для лучшей сходимости аэродинамической задачи предусмотрены пограничные слои. Это повышает адекватность расчета скоростей воздуха вдоль стенок.

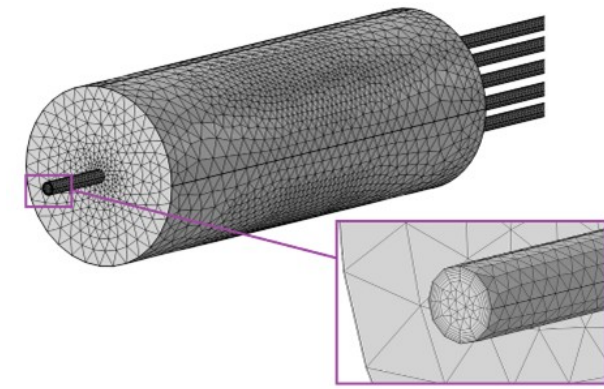


Рисунок 3 - Изображение сетки геометрической модели электроозонатора  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.36.3>

### Результаты исследований и обсуждение

После установления интерфейсов и нескольких реализаций с корректировками были получены результаты моделирования в специальном интерфейсе программы. Вывод результатов проводился в графическом и табличном видах. Так, например, были получены поля распределения концентраций озона в отдельных составляющих озонатора, а также скоростей и давлений газа (рис. 4, рис. 5).

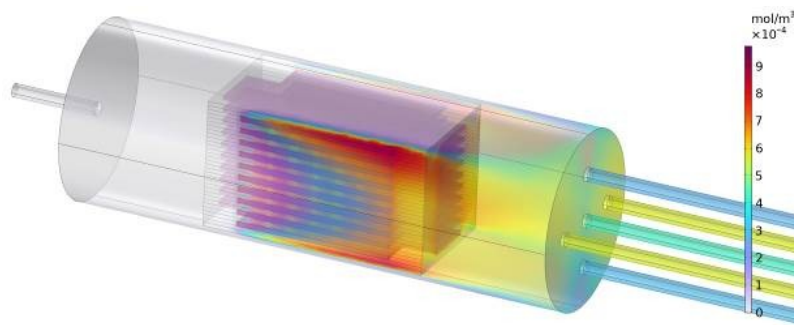


Рисунок 4 - Изображение полей распределения концентраций озона внутри озонатора  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.36.4>

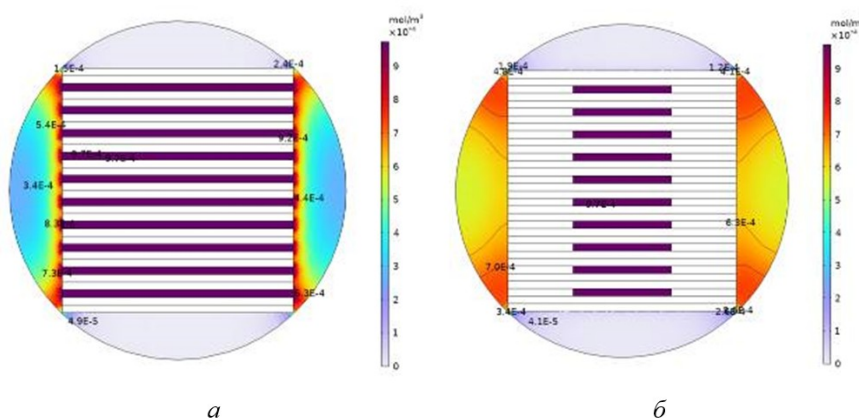


Рисунок 5 - Изображения полей распределения концентраций озона в сечениях: в середине разрядного устройства (а) и на выходе озонозвоздушной смеси (б)  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.36.5>

Анализ полученных результатов показал, что максимальная концентрация озона внутри озонатора составляет  $9,7 \cdot 10^{-4}$  моль/м<sup>3</sup> или 46,37 мг/м<sup>3</sup>. Это значение концентрации озона соответствует подобным установкам и согласуется с экспериментами [1], [2], [3], [4], [14]. Такое сопоставление подтверждает адекватность полученных моделей. Исследования полученных данных показали неравномерность концентрации озона внутри корпуса, особенно в выходной части озонатора. Наблюдается значительная разница в концентрациях озона в отдельных выходных патрубках – от  $2,7 \cdot 10^{-4}$  моль/м<sup>3</sup> до  $5,6 \cdot 10^{-4}$  моль/м<sup>3</sup>, (в 2 раза). Наибольшие концентрации озона имеют в боковых патрубках озонатора –  $5,6 \cdot 10^{-4}$  моль/м<sup>3</sup> (или 26,8 мг/м<sup>3</sup>). В центральной трубке, концентрация озона составляет –  $4,4 \cdot 10^{-4}$  моль/м<sup>3</sup> (21 мг/м<sup>3</sup>). Минимальная концентрация озона наблюдается в верхнем и нижнем патрубках –  $2,7 \cdot 10^{-4}$  моль/м<sup>3</sup>,  $2,8 \cdot 10^{-4}$  моль/м<sup>3</sup> (12,9 мг/м<sup>3</sup> и 13,4 мг/м<sup>3</sup>). Выявленная неравномерность концентраций озона в отдельных патрубках при обработке нескольких ульев приведет к различным вносимым дозам в отдельные пчелиные семьи. Это может привести к неэффективной обработке пчел и продолжению их заболевания. Следовательно, необходима установка какой-либо дополнительной конструкции для выравнивания концентраций в воздуховодах.

### Заключение

1. Разработана геометрическая модель озонатора для обработки озоном пчелиных ульев, включающая разрядный блок барьерного типа с электродами пластинчатого типа и изолирующий корпус с выходными патрубками.
2. Получено математическое описание основных процессов в озонаторе, включающее выражения основных химических реакций, уравнения переноса массы вещества, функции распределения энергий электронов по Максвеллу и уравнений Навье-Стокса.
3. Разработана компьютерная математическая модель основных процессов, происходящих в озонаторе при его работе, в которой имеются начальные и граничные условия, математические описания процессов и учитываются характеристики компрессора.
4. Результаты анализа реализаций компьютерной математической модели озонатора в ПО Comsol показали, что поле концентраций озона в выходных патрубках неравномерно и может отличаться в 2 раза (от 12,9 мг/м<sup>3</sup> до 26,8 мг/м<sup>3</sup>). Для создания равномерности концентраций озона необходима установка дополнительной конструкции, выравнивающей общую концентрацию озона на выходе из разрядного блока.
5. Используя полученную компьютерную математическую модель озонатора, можно будет проводить коррекцию его геометрии, изменять параметры и режимы с целью получения их оптимальных значений.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Рецензия**

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Review**

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

**Список литературы / References**

1. Число пчелосемей на Кубани сократилось в два раза! Что делать? Депутат Госдумы от КПРФ провёл круглый стол по развитию пчеловодства // Общественно-политический портал «Утренний юг». — URL: [https://utyug.info/new/27953/?sphrase\\_id=27223](https://utyug.info/new/27953/?sphrase_id=27223) (дата обращения: 01.11.2023).
2. Оськин С.В. Электротехнологические способы и оборудование для повышения производительности труда в медотоварном пчеловодстве Северного Кавказа / С.В. Оськин, Д.А. Овсянников. — Краснодар : Крон, 2015. — 198 с.
3. Оськин С.В. Необходимость применения экологически чистых способов обработки пчелиных семей от существующих болезней / С.В. Оськин, Д.А. Овсянников // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. — 2014. — № 2 (18). — С. 134–144.
4. Оськин С.В. Электротехнологии в сельском хозяйстве / С.В. Оськин. — Краснодар, 2016. — 501 с.
5. Пат. 2217909 Российская Федерация, МПК А01К 51/00. Способ обеззараживания пчелиных соторамок при нозематозе / Д.А. Нормов, В.В. Лисицын, Д.А. Овсянников; заявители и патентообладатели ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет». — № 2001132923/13; заявл. 03.12.2001; опубл. 10.12.2003, Бюл. №34.
6. Пат. 2318381 Российская Федерация, МПК А01К 51/00. Способ борьбы с варроатозом пчел / А.А. Овсянников, Д.А. Овсянников, С.А. Николаенко; заявители и патентообладатели ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет». — № 2006128061/12; заявл. 01.08.2006; опубл. 10.03.2008, Бюл. №7.
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. Силкин Е. Синтез озона в электрических разрядах и повышение его эффективности. Часть 1 / Е. Силкин // Компоненты и технологии. — 2008. — № 6 (83). — С. 136–143.
9. Документация на модуль Plasma программы Comsol Multiphysics / Comsol.Inc. — 436 с.
10. Функция распределения электронов по энергии // Блог компании Comsol. — URL: <https://www.comsol.ru/blogs/electron-energy-distribution-function> (дата обращения: 12.01.2023).
11. Формулы. Молекулярно-кинетическая теория // Вся физика. Научно образовательный проект. — URL: [https://sfiz.ru/materials/spravks/molekuljarno-kineticheskaja\\_teorija](https://sfiz.ru/materials/spravks/molekuljarno-kineticheskaja_teorija) (дата обращения: 12.01.2023).
12. Документация на модуль Electrochemistry программы Comsol Multiphysics / Comsol.Inc. — 416 с.
13. Документация на модуль CFD программы Comsol Multiphysics / Comsol.Inc. — 1014 с.
14. Оськин С.В. Необходимость модернизации основных технологических процессов в пчеловодстве / С.В. Оськин, А.А. Лоза, С.М. Федак [и др.] // Сельский механизатор. — 2022. — № 12. — С. 6–7.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Chislo pchelosemej na Kubani sokratilos' v dva raza! Chto delat'? Deputat Gosdumy ot KPRF provjol kruglyj stol po razvitiju pchelovodstva [The number of bee families in Kuban has halved! What to do? State Duma deputy from the CPRF held a round table on the development of beekeeping] // Obshhestvenno-politicheskij portal «Utrennij jug» [Public and political portal "Utrenny Yug"]. — URL: [https://utyug.info/new/27953/?sphrase\\_id=27223](https://utyug.info/new/27953/?sphrase_id=27223) (accessed: 01.11.2023). [in Russian]
2. Os'kin S.V. Jelektrotehnologicheskie sposoby i oborudovanie dlja povyshenija proizvoditel'nosti truda v medotovarnom pchelovodstve Severnogo Kavkaza [Electro-technological methods and equipment for increasing labour productivity in honey beekeeping in the North Caucasus] / S.V. Os'kin, D.A. Ovsjannikov. — Krasnodar : Kron, 2015. — 198 p. [in Russian]
3. Os'kin S.V. Neobhodimost' primenenija jekologicheski chistyh sposobov obrabotki pchelinyh semej ot sushhestvujushhijh boleznej [Necessity of application of ecologically clean ways of treatment of bee families from existing diseases] / S.V. Os'kin, D.A. Ovsjannikov // Chrezvychajnye situacii: promyshlennaja i jekologicheskaja bezopasnost' [Emergencies: Industrial and Ecological Safety]. — 2014. — № 2 (18). — P. 134–144. [in Russian]
4. Os'kin S.V. Jelektrotehnologii v sel'skom hozjajstve [Electrotechnology in agriculture] / S.V. Os'kin. — Krasnodar, 2016. — 501 p. [in Russian]
5. Pat. 2217909 Russian Federation, MPK A01K 51/00. Sposob obezzarazhivanija pchelinyh sotoramok pri nozematoze [Method of disinfection of bee sotoramok at nosematosis] / D.A. Normov, V.V. Lisicyn, D.A. Ovsjannikov; applicants and patent holders FSBEI HE «Kuban State Agrarian University». — № 2001132923/13; appl. 03.12.2001; publ. 10.12.2003, Bull. №34. [in Russian]
6. Pat. 2318381 Russian Federation, MPK A01K 51/00. Sposob bor'by s varroatozom pchel [Method of bee varroatois control] / A.A. Ovsjannikov, D.A. Ovsjannikov, S.A. Nikolaenko; applicants and patent holders FSBEI HE «Kuban State Agrarian University». — № 2006128061/12; appl. 01.08.2006; publ. 10.03.2008, Bull. №7. [in Russian]
7. Loza A.A. Obosnovanie parametrov sistemy gruppovogo ozonirovanija ul'ev [Substantiation of parameters of the system of group ozonation of hives] / S.V. Os'kin, A.A. Loza // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal

[International Research Journal]. — 2023. — № 12 (138). — URL: <https://research-journal.org/archive/12-138-2023-december/10.23670/IRJ.2023.138.20> (accessed: 06.01.2024). DOI: 10.23670/IRJ.2023.138.20. [in Russian]

8. Silkin E. Sintez ozona v jelektricheskikh razrjadah i povyshenie ego jeffektivnosti. Chast' 1 [Ozone synthesis in electric discharges and increase of its efficiency. Part 1] / E. Silkin // Komponenty i tehnologii [Components and Technologies]. — 2008. — № 6 (83). — P. 136–143. [in Russian]

9. Dokumentacija na modul' Plasma programmy Comsol Multiphysics [Comsol Multiphysics Plasma Module documentation] / Comsol.Inc. — 436 p. [in Russian]

10. Funkcija raspredelenija jelektronov po jenergii [Electron energy distribution function] // Blog kompanii Comsol [Comsol Company blog]. — URL: <https://www.comsol.ru/blogs/electron-energy-distribution-function> (accessed: 12.01.2023). [in Russian]

11. Formuly. Molekuljarno-kineticheskaja teorija [Formulas. Molecular-kinetic theory] // Vsja fizika. Nauchno obrazovatel'nyj proekt [All Physics. Scientific educational project]. — URL: [https://sfiz.ru/materials/spravks/molekuljarno-kineticheskaja\\_teorija](https://sfiz.ru/materials/spravks/molekuljarno-kineticheskaja_teorija) (accessed: 12.01.2023). [in Russian]

12. Dokumentacija na modul' Electrochemistry programmy Comsol Multiphysics [Comsol Multiphysics Plasma Module documentation] / Comsol.Inc. — 416 p. [in Russian]

13. Dokumentacija na modul' CFD programmy Comsol Multiphysics [Comsol Multiphysics Plasma Module documentation] / Comsol.Inc. — 1014 p. [in Russian]

14. Os'kin S.V. Neobhodimost' modernizacii osnovnyh tehnologicheskikh processov v pchelovodstve [Necessity of modernization of the main technological processes in beekeeping] / S.V. Os'kin, A.A. Loza, S.M. Fedak [et al.] //Sel'skij mehanizator [Rural Mechanizer]. — 2022. — № 12. — P. 6–7. [in Russian]