

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

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.113>

**КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА БАРБОТИРОВАНИЯ АНОЛИТА ОЗОНОМ В АНОДНОЙ
КАМЕРЕ ПРОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА ВОДЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕЗИНФИЦИРУЮЩИХ
РАСТВОРОВ НА ПАСЕКЕ**

Научная статья

Цокур Е.С.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0001-5401-8669;

¹ Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (sun_kate03[at]mail.ru)

Аннотация

В современном пчеловодстве существует тенденция к применению экологически чистых средств для профилактики и лечения болезней пчел. В настоящий момент существует несколько электротехнологий позволяющих получать средства дезинфекции для обработки пчелиных ульев. Среди них можно выделить технологии озонирования и получения электроактивированных растворов методом диафрагменного электролиза воды, в частности анолита. Существуют исследования, объединяющие эти две технологии для увеличения дезинфицирующих свойств анолита, которым опрыскивают улья и пчелиный инвентарь. Вначале получают анолит, а затем барботируют его озоном. Но установки для получения электроактивированных растворов, насыщенных озоном, имеют малую производительность – до 0,4-0,5 л в течение 15-20 минут. При этом процесс обработки 20 пчелиных ульев с учетом времени на получение растворов занимает около 5 часов. При этом количество приготовлений раствора составляет не менее 5 раз. Сократить время на приготовление растворов до 1-2 минут, а значит и время на обработку ульев, можно путем использования проточного диафрагменного электролизера воды. Для этого требуется вначале провести компьютерное моделирование процесса барботажа анолита в анодной камере установки с целью интенсифицировать процесс массопередачи озона в раствор. В статье рассматривается разработанная компьютерная модель данного процесса в ПО Comsol Multiphysics, на базе уравнений Навье-Стокса и закона Генри. В статье даны значения коэффициента массопередачи и константы Генри для рассматриваемого случая. Приведены результаты моделирования и показаны варианты дальнейшего совершенствования технологии.

Ключевые слова: анолит, озон, пчеловодство, проточный диафрагменный электролизер, компьютерное моделирование, Comsol Multiphysics.

**COMPUTER MODEL OF THE PROCESS OF ANOLYTE BUBBLING WITH OZONE IN THE ANODE CHAMBER
OF A FLOW-THROUGH WATER ELECTROLYSER TO PRODUCE DISINFECTANT SOLUTIONS IN AN APIARY**

Research article

Tsokur Y.S.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0001-5401-8669;

¹ Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation

* Corresponding author (sun_kate03[at]mail.ru)

Abstract

In modern beekeeping, there is a tendency to use environmentally friendly means for the prevention and treatment of bee diseases. At present, there are several electro-technologies allowing to obtain disinfectants for treatment of bee hives. Among them, it is possible to distinguish technologies of ozonation and production of electroactivated solutions by diaphragm electrolysis of water, in particular anolyte. There are studies combining these two technologies to increase the disinfectant properties of anolyte, which is used to spray hives and bee equipment. The anolyte is first produced and then barbotized with ozone. But installations for obtaining electroactivated solutions saturated with ozone have low productivity – up to 0.4-0.5 litres within 15–20 minutes. Thus, the process of treatment of 20 bee hives taking into account the time for receiving solutions takes about 5 hours. At the same time, the number of solution preparation is at least 5 times. It is possible to reduce the time for preparation of solutions to 1–2 minutes, and hence the time for treatment of hives, by using a flow-through diaphragm water electrolyser. For this purpose, it is necessary to firstly carry out computer modelling of the process of anolyte bubbling in the anode chamber of the unit in order to intensify the process of ozone mass transfer into solution. The article deals with the developed computer model of this process in Comsol Multiphysics software, based on the Navier-Stokes equations and Henry's law. The paper gives the values of mass transfer coefficient and Henry's law constant for the studied case. The results of modelling are given and options for further improvement of the technology are shown.

Keywords: anolyte, ozone, beekeeping, flow diaphragm electrolyser, computer modelling, Comsol Multiphysics.

Введение

Широко применение электроактивированных водных растворов в сельском хозяйстве. Они могут быть использованы как в растениеводстве для полива растений, изменения pH почвы, замачивания семян, растворения гербицидов и т.п., так и в животноводстве для поения молодняка КРС и даже в пчеловодстве для обеззараживания

ульев и поения пчел [1], [2], [3], [4], [5]. Такое разнообразное применение обусловлено не только тем, что вода играет важную роль во многих сельскохозяйственных процессах, но и свойствами электроактивированных растворов. В ходе диафрагменного электролиза воды получаются два водных раствора: анолит и католит. Первый обладает дезинфицирующими свойствами, низкими значениями pH от 2,7 до 7 и высоким ОВП, значения которого могут достигать свыше +1000 мВ. Католит, напротив, обладает восстановительными свойствами, высоким pH от 7 до 12, а также отрицательными значениями ОВП, которые могут достигать -1000 мВ и менее.

Высокая значимость данной технологии для АПК требует совершенствования электрооборудования для ее проведения. Для получения вышеописанных растворов используются различные варианты диафрагменных электролизеров. Они бывают двух видов: непроточные или так называемые бытовые и проточные. Первые имеют низкие массогабаритные показатели, не требуют высоких затрат электроэнергии и, как следствие, обладают низкой производительностью. Проточные электролизеры, напротив, имеют высокую производительность, но при этом потребляют в десятки раз больше электроэнергии. Бытовые электролизеры хорошо изучены и процессы, протекающие в них достаточно хорошо описаны в [8]. Там же приведена компьютерная модель наиболее часто используемого диафрагменного непроточного электролизера «Ива», который использовался для получения анолита, как дезинфицирующего средства, используемого на пасеке для дезинфекции ульев. При этом получаемый электроактивированный раствор перед использованием барботировался озоном для увеличения дезинфицирующих свойств. К недостаткам установки описанной в [8] относятся низкая производительность – до 0,5 л в течение 15-20 минут, а также последовательная комбинация технологий электролиза и озонирования, что увеличивает время получения дезинфицирующего средства. По нашему мнению, использование проточной установки существенно увеличит производительность. При этом возможно одновременное использование применяемых технологий, что также ускорит время получения дезинфицирующего раствора для проведения профилактических и лечебных мероприятий на пасеке.

Цель исследования – разработать компьютерную модель в ПО Comsol Multiphysics, описывающую процесс массопередачи озона в воду при диафрагменном электролизе воды для совершенствования технологии получения экологически чистых дезинфицирующих растворов на пасеках.

Материалы и методы исследования

Геометрическая модель предлагаемой установки показана на рис. 1. В ней осуществляется подача исходной воды в анодную камеру электролизера, представляющую из себя зигзагообразный канал, одновременно с подачей озона через специальный тройник на входе.

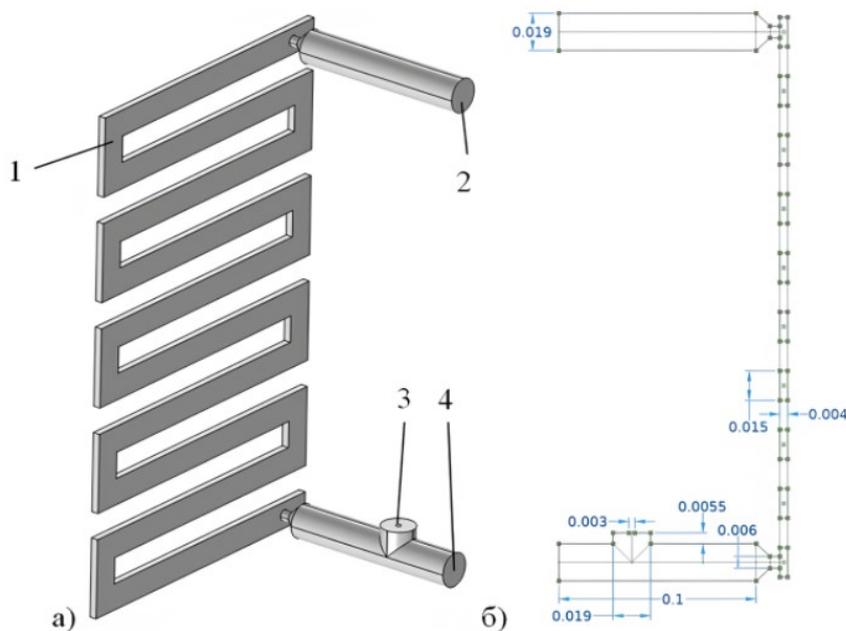


Рисунок 1 - Изображения геометрической модели электролизера для получения дезинфицирующих растворов на пасеке: общий вид (а) и вид сбоку с размерами указанными в метрах (б)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.113.1>

Примечание: 1 – зигзагообразный канал анодной камеры; 2 – отверстие для выхода анолита; 3 – отверстие для подачи озонозодушной смеси; 4 – отверстие для подачи исходной воды

Рассмотрением катодной камеры, а также области занимаемой диафрагмой пренебрегаем, т.к. считаем, что диаметр пузырьков газа больше пор диафрагмы и таким образом они локализованы только в анодной камере.

Для описания процесса барботирования анолита озонном необходимо рассмотреть: поле скоростей газа и воды; массопередачу газа из пузырьков в жидкость. Поток газа и воды через анодную камеру можно описать с помощью уравнений Навье-Стокса. Учитывая небольшой расход воды – до 1,5 л/мин и зная из геометрической модели установки диаметр выходного отверстия – 19 мм (рис. 1), можно определить число Рейнольдса Re . При указанных параметрах установки и стандартных условиях оно будет равно $Re = 1672$. Таким образом, поток через установку будет ламинарным и для несжимаемой среды [9]:

$$\begin{cases} \varphi_l \rho_l \frac{\partial u_l}{\partial t} + \varphi_l \rho_l (u_l \cdot \nabla) u_l = \nabla \left(-p + \varphi_l \mu_l \left(\nabla u_l + (\nabla u_l)^T - \frac{2}{3} (\nabla u_l) I \right) \right) + \varphi_l \rho_l g \\ \frac{\partial}{\partial t} (\varphi_l \rho_l + \varphi_g \rho_g) + \nabla (\varphi_l \rho_l u_l + \varphi_g \rho_g u_g) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где φ_l – объемная доля воды, $\text{м}^3/\text{м}^3$; ρ_l – плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; u_l – скорость воды, $\text{м}/\text{с}$; p – давление, Па; g – сила свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; μ_l – динамическая вязкость жидкости, Па·с; T – температура, К; I – единичный вектор; u_g – скорость газа, $\text{м}/\text{с}$; φ_g – объемная доля газа, $\text{м}^3/\text{м}^3$; ρ_g – плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Скорость массопередачи m_{gl} определяется в соответствии с законом Генри:

$$m_{gl} = k (c_p - c_{O_3}) M a, \quad (2)$$

где k – коэффициент массопередачи, $\text{м}/\text{с}$; c_p – равновесная концентрация озона в воде, $\text{моль}/\text{м}^3$; c_{O_3} – концентрация растворенного озона в воде, $\text{моль}/\text{м}^3$; M – молярная масса озона, равная 47,998 г/моль; a – площадь поверхности раздела фаз на единицу объема, $\text{м}^2/\text{м}^3$.

$$a = (4n\pi)^{1/3} (3\varphi_g)^{2/3}, \quad (3)$$

где n – плотность пузырьков или количество пузырьков в объеме φ_g , $1/\text{м}^3$.

Равновесная концентрация озона в воде c_p прямо пропорциональна давлению p в установке и обратно пропорциональна константе Генри H [Па·м³/моль]. В работе [10] указано, что для озона, растворяемого в воде коэффициент массопередачи k лежит в пределах от $2 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-3}$ м/с (в компьютерной модели принят равным $2,5 \cdot 10^{-3}$ м/с), а константа Генри равна 0,22 кПа·л/мг или 10561,7 Па·м³/моль.

Растворенный озон согласно [11] вступает в реакцию с ионами гидроксида и водой, в результате чего образуется дополнительный кислород, и гидропероксид. Данные химические реакции также необходимо учесть, т.к. насыщение воды кислородом важно в некоторых технологических процессах, например, при гидропонном выращивании растений, к тому же кислород, как и озон, тоже является хорошим окислителем (хоть и не таким сильным, как озон), что также способствует увеличению дезинфицирующих свойств получаемого раствора.

Компьютерное моделирование проводилось в ПО Comsol Multiphysics. Для моделирования использовались три физических интерфейса. Интерфейс "Laminar Flow" использовался для определения поля скоростей u_l , u_g и давлений p воды и пузырей газа в установке. Интерфейс "Transport of Diluted Species" использовался для расчета поля концентрации растворенного озона c_{O_3} на выходе из установки. Также для учета химических реакций озона с водой и ионами гидроксида был задействован интерфейс "Chemistry". В качестве граничных условий были заданы стандартные гидродинамические условия Inlet, Outlet и Wall (рис. 2). Концентрация озона на входе в установку задавалась равной 2000 мг/м³, что соответствует концентрации получаемой от бытового электроозонатора.

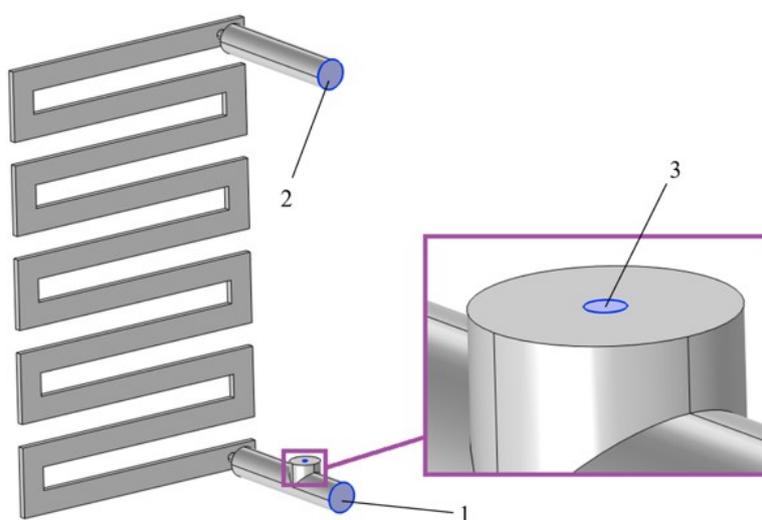


Рисунок 2 - Изображение поверхностей (показаны синим цветом), на которых были заданы граничные условия

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.113.2>

Примечание: 1 – Inlet; 2 – Outlet; 3 – Wall

Для проверки разработанной компьютерной модели была изготовлена установка, размеры камер которой совпадают с размерами, представленными в геометрической модели (рис. 3). Для измерения, растворенного в воде озона, использовался измеритель DOZ30.



Рисунок 3 - Фотография зигзагообразного канала одной из камер изготовленного проточного электролизера
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.113.3>

Результаты исследований и обсуждение

В результате компьютерной обработки были получены поля концентраций растворенного в воде озона c_{O_3} и образованного в результате химических реакций кислорода c_{O_2} при разном расходе раствора Q через анодную камеру. Так на рис. 4 показаны поля распределения c_{O_3} и c_{O_2} в установке через 2 минуты при $Q = 0,75$ л/мин. Наибольшие концентрации озона сосредоточены в начале установки и достигают при этом значений до $10 \cdot 10^{-5}$ моль/м³. В остальной же части до самого выхода поле концентраций растворенного озона c_{O_3} равномерно и составляет $7,7 \cdot 10^{-5}$ моль/м³, что соответствует 0,0037 мг/л. Концентрации кислорода c_{O_2} в установке составляют не более $10 \cdot 10^{-6}$ моль/м³.

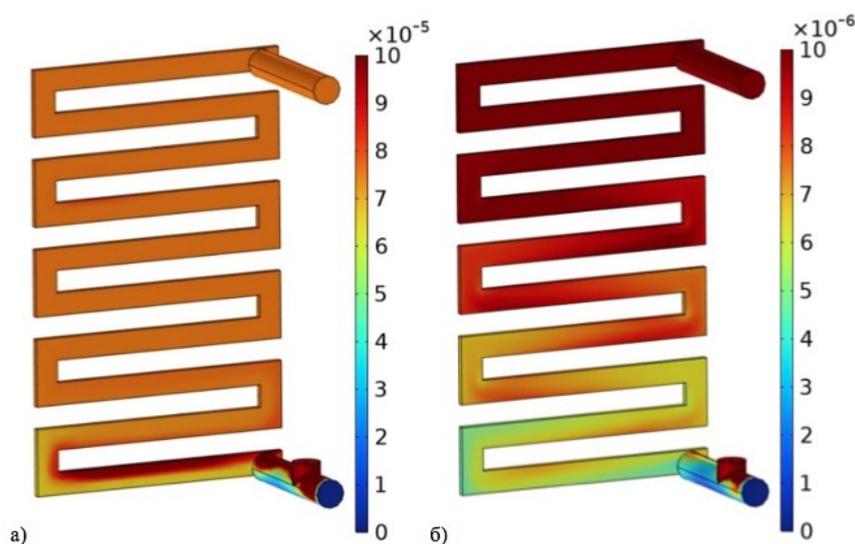


Рисунок 4 - Изображение поля концентраций озона c_{O_3} , растворенного в потоке воды в результате барботирования им потока анолита при расходе воды через анодную камеру $Q = 0,75$ л/мин через 2 минуты барботаж
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.113.4>

При расходе Q от 0,5 л/мин до 0,75 л/мин концентрации растворенного озона на выходе из установки составляют не более $9 \cdot 10^{-5}$ моль/м³, а время их достижения 40-50 секунд (рис. 5). Таким образом, время на приготовление 0,5 л раствора составит от 1,5 до 2 минут. Дальнейшее уменьшение расхода до 0,25 л/мин приводит к увеличению растворенного в воде озона до $10,2 \cdot 10^{-5}$ моль/м³ или около 0,005 мг/л. Но при этом время выхода на установившийся режим по озону увеличивается и занимает 70 секунд, а время получения 0,5 л раствора составляет более 3-х минут.

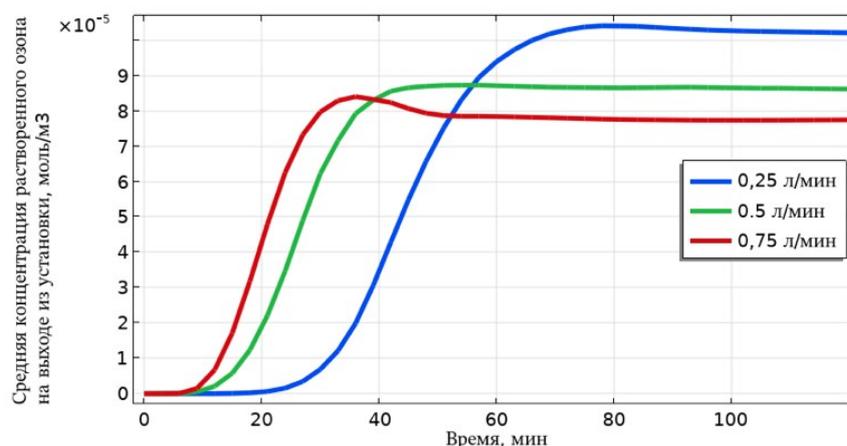


Рисунок 5 - Графики изменения во времени средней концентрации растворенного озона c_{O_3} на выходе из установки при различном расходе Q

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.113.5>



Рисунок 6 - Фотография процесса измерения растворенного озона в полученном растворе при $Q = 0,1$ л/мин

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.113.6>

Измеряемые значения растворенного озона c_{O_3} в получаемых растворах при расходе воды через анодную камеру Q до 0,25 л/мин не превышали 0,01 мг/л, что соответствует полученным значениям при компьютерном моделировании (рис. 6). Измерение меньших концентраций озона c_{O_3} при расходе Q свыше 0,25 л/мин было затруднено ввиду технических ограничений применяемого измерительного прибора.

Для увеличения концентрации озона в воде следует рассмотреть возможность интенсификации процесса его растворения в анолите. Исходя из полученных полей концентраций озона c_{O_3} и кислорода c_{O_2} , дальнейшее увеличение длины канала анодной камеры электролизера не приведет к их увеличению. Для этого возможно использование насадок из мелкопористого материала для уменьшения диаметра пузырей газа (в компьютерной модели их диаметр был равен 3 мм исходя из геометрических размеров входного отверстия), что в свою очередь увеличит площадь поверхности раздела фаз a и тем самым увеличит массопередачу m_{gl} согласно (2). Другим способом увеличения концентрации растворенного в воде озона является использование трубки Вентури вместо тройника на входе в анодную камеру.

Заключение

1. Разработана компьютерная модель процесса барботирования анолита озоном непосредственно в анодной камере проточного электролизера воды с целью быстрого получения дезинфицирующих растворов на пасеке. Модель основана на уравнения Навье-Стокса и законе Генри.

2. В результате компьютерного моделирования, а также экспериментальных исследований на разработанной проточной установке определено, что при расходе воды через анодную камеру электролизера 0,5-0,75 л/мин концентрации растворенного в анолите озона не превышают $9 \cdot 10^{-5}$ моль/м³ (не более 0,005 мг/л). При этом время выхода на установившийся режим работы составляет 40-50 секунд, а время получения 0,5 л раствора составляет не более 2 минут, что в 7 раз быстрее, чем при использовании непроточной установки. Дальнейшее уменьшение расхода приводит к увеличению концентрации растворенного в анолите озона до 0,01 мг/л, но при этом значительно увеличивается время его получения.

3. Определено, что дальнейшее увеличение длины анодной камеры не ведет к увеличению растворенного в воде озона и для интенсификации процесса требуется либо уменьшение диаметра пузырей путем использования мелкопористых насадок в месте входа озона в воду, либо использование трубки Вентури для смешивания озона с водой.

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. Нугманов С.С. Влияние электроактивированной воды при поливе на состав и продуктивность листового салата / С.С. Нугманов, Ю.С. Иралиева, Т.С. Гриднева // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. — 2016. — № 4. — С. 32–35.
2. Цокур Д.С. Система стабилизации кислотности почвы при выращивании томатов в условиях закрытого грунта / Д.С. Цокур // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2013. — № 93. — С. 998–1020.
3. Харченко О.В. Совершенствование технологии выращивания ячменя с использованием электрохимически активированной воды / О.В. Харченко, В.Н. Чурзин, И.М. Осадченко // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. — 2007. — № 1 (5). — С. 109–112. — EDN MRMWTR.
4. Оськин С.В. Разработка математической модели электроактиватора с учетом данных о качестве воды и требований к рабочему раствору гербицида / С.В. Оськин, Н.Ю. Курченко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2015. — № 107. — С. 1226–1244.
5. Семенов М.П. Применение анолита в лечении желудочно-кишечных заболеваний телят / М.П. Семенов, Е.В. Кузьмина, Е.В. Рогалева, [и др.] // Ветеринарный фармакологический вестник. — 2022. — № 1 (18). — С. 59–68.
6. Овсянников Д.А. Способ борьбы с варроатозом пчел : пат. 2430511 С1 РФ, МПК А01К 51/00 / Д.А. Овсянников, С.А. Николаенко, А.П. Волошин [и др.]; заявитель и правообладатель Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина. — № 2010105580/21; заявл. 2010-02-16; опубл. 2011-10-10.
7. Овсянников Д.А. Способ профилактики бактериозов пчел в условиях умеренно-континентального климата : № 2660934 С1 НА, МПК А01К 51/00 / Д.А. Овсянников, С.А. Николаенко, Д.С. Цокур [и др.]; заявитель и правообладатель Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина. — № 2017114243 : заявл. 2017-04-24 : опубл. 2018-07-11.
8. Волошин С.П. Параметры и режимы комбинированной электроактиваторной установки для получения дезинфицирующих растворов в пчеловодстве : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / С.П. Волошин. — 2019. — 151 с.
9. Документация на модуль CFD программы Comsol Multiphysics. Comsol Inc. — 1014 с.
10. Zhou H. Modeling of Dissolved Ozone Concentration Profiles in Bubble Columns / H. Zhou, D.W. Smith, S.J. Stanley // Journal of Environmental Engineering. — 1994. — Vol. 120. — № 4. — P. 821–840.
11. Rodríguez A. Ozone-Based Technologies in Water and Wastewater Treatment / A. Rodríguez, R. Rosal, J.A. Perdigón-Melón // Hdb Env Chem. — 2008. — Vol. 5. — Part S/2. — P. 127–175.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Nugmanov S.S. Vliyanie elektroaktivirovannoy vody pri polive na sostav i produktivnost' listovogo salata [The effect of electroactivated water on the composition and productivity of leaf lettuce when irrigated] / S.S. Nugmanov, Yu.S. Iralieva, T.S. Gridneva // Izvestiya Samarskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii [Proceedings of the Samara State Agricultural Academy]. — 2016. — № 4. — P. 32–35. [in Russian]
2. Tsokur D.S. Sistema stabilizatsii kislotnosti pochvy pri vyrashchivanii tomatov v usloviyakh zakrytogo grunta [Soil acidity stabilization system for growing tomatoes in greenhouse conditions] / D.S. Tsokur // Politematicheskii setevoy

elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Polythematic Online Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University]. — 2013. — № 93. — P. 998–1020. [in Russian]

3. Kharchenko O.V. Sovershenstvovanie tehnologii vyrashhivaniya jachmenja s ispol'zovaniem jelektrohimičeski aktivirovannoj vody [Improvement of the technology of growing barley using electrochemically activated water] / O.V. Kharchenko, V.N. Churzin, I.M. Osadchenko // Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie [Izvestia of the Nizhnevolzhsky Agrouniversity Complex: Science and higher professional education]. — 2007. — № 1 (5). — P. 109–112. — EDN MRMWTR.

4. Oskin S.V. Razrabotka matematičeskoj modeli elektroaktivatora s učetom dannyx o kachestve vody i trebovaniy k rabochemu rastvoru gerbitsida [Development of a mathematical model of an electroactivator taking into account water quality data and requirements for the working solution of a herbicide] / S.V. Oskin, N.Yu. Kurchenko // Politematičeskij setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Polythematic Online Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University]. — 2015. — № 107. — P. 1226–1244. [in Russian]

5. Semenenko M.P. Primenenie anolita v lečenii zheludochno-kishečnykh zabolevaniy telyat [The use of anolyte in the treatment of gastrointestinal diseases in calves] / M.P. Semenenko, E.V. Kuzminova, E.V. Rogaleva [et al.] // Veterinarnyy farmakologičeskij vestnik [Veterinary Pharmacological Bulletin]. — 2022. — № 1 (18). — P. 59–68. [in Russian]

6. Ovsyannikov D.A. Sposob bor'by s varroatozom pchel [Method for controlling varroosis in bees] : pat. 2430511 C1 Russian Federation, MPK A01K 51/00 / D.A. Ovsyannikov, S.A. Nikolaenko, A.P. Voloshin [et al.]; the applicant and the patentee Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. — № 2010105580/21 : appl. 2010-02-16 : publ. 2011-10-10. [in Russian]

7. Ovsyannikov D.A. Sposob profilaktiki bakteriozov pchel v usloviyakh umerenno-kontinental'nogo klimata [Method for preventing bee bacteriosis in a temperate continental climate] : pat. № 2660934 C1 Russian Federation, MPK A01K 51/00 / D.A. Ovsyannikov, S.A. Nikolaenko, D.S. Tsokur [et al.]; the applicant and the patentee Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. — № 2017114243 : appl. 2017-04-24 : publ. 2018-07-11. [in Russian]

8. Voloshin S.P. Parametry i rezhimy kombinirovannoy elektroaktivatornoy ustanovki dlya polucheniya dezinfitsiruyushchikh rastvorov v pchelovodstve [Parameters and modes of a combined electroactivator unit for obtaining disinfectant solutions in beekeeping] : dis. ... of PhD in Engineering : 05.20.02 / S.P. Voloshin. — 2019. — 151 p. [in Russian]

9. Dokumentatsiya na modul CFD programmy Comsol Multiphysics. Comsol Inc [Documentation for the CFD Module of Comsol Multiphysics Software. Comsol Inc. — 1014 p.

10. Zhou H. Modeling of Dissolved Ozone Concentration Profiles in Bubble Columns / H. Zhou, D.W. Smith, S.J. Stanley // Journal of Environmental Engineering. — 1994. — Vol. 120. — № 4. — P. 821–840.

11. Rodríguez A. Ozone-Based Technologies in Water and Wastewater Treatment / A. Rodríguez, R. Rosal, J.A. Perdigón-Melón // Hdb Env Chem. — 2008. — Vol. 5. — Part S/2. — P. 127–175.