

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И.Т.ТРУБИЛИНА»

На правах рукописи



Цокур Екатерина Сергеевна

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

Специальность: 4.3.2 – Электротехнологии, электрооборудование и
энергоснабжение агропромышленного комплекса

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Оськин С.В.

Краснодар – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	9
1.1 Болезни пчел и способы их лечения.....	9
1.2 Существующие электротехнологические способы повышения эффективности дезинфекции и стимуляции развития биологических объектов.....	17
1.3 Особенности применения технологий озонирования и электроактивации водных растворов в пчеловодстве.....	22
1.4 Выводы и задачи исследований.....	30
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БАРБОТИРОВАНИЯ ПОТОКА АНОЛИТА ОЗОНОМ.....	33
2.1 Разработка конструкции проточного электроактиватора и обоснование выбора теоретических положений, описывающих основные процессы.....	33
2.2 Разработка математических моделей основных процессов в проточном электроактиваторе.....	40
2.3 Получение обобщенной математической модели и ее реализация в ПО Comsol Multiphysics.....	48
2.4 Способ насыщения анолита озоном в потоке.....	59
2.5 Выводы по главе.....	62
3. МЕТОДИКА, РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ ПРОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОАКТИВАТОРА.....	64
3.1 Методика проведения экспериментальных исследований.....	64
3.2 Результаты проверки адекватности модели теплофизических процессов в проточном электроактиваторе.....	69
3.3 Результаты влияния параметров процесса получения озоносодержащего анолита на выживаемость плесневого гриба <i>Penicillium sp.</i> , а также итоги полевых испытаний разработанного проточного электроактиватора.....	75
3.4 Разработка принципиальной электрической схемы управления проточным электроактиватором воды и алгоритма его работы.....	81
3.5 Экономическая эффективность внедрения проточного электроактиватора для профилактической обработки ульев на пасеке в 50 пчелиных семей.....	86
3.6 Выводы по главе.....	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	95
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	98
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	119

ВВЕДЕНИЕ

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

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

Степень разработанности темы. Большой вклад в развитие установок, облегчающих труд работников сельского хозяйства в том числе пчеловодов, внесли учёные ФГБОУ ВО РГАТУ имени П.А. Костычева (г. Рязань), Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ (г. Зерноград), ФГБОУ ВО Удмуртского ГАУ (г. Ижевск), ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва), ФГБОУ ВО Ставропольского ГАУ (г. Ставрополь) и др. Применению электротехнологий в отдельных отраслях АПК посвящали свои работы Степанчук Г.В., Кондратьева Н.П., Юдаев И.В., Стародубцева Г.П., Лекомцев П.Л. и др. Вопросами озонирования и применения электролизеров в сельском хозяйстве, в том числе в пчеловодстве занимались: С.В. Оськин, В.Ф. Сторчевой, Д.А. Овсянников, С.А. Николаенко, С.П. Волошин, Д.С. Цокур и другие. Несмотря на глубину проводимых исследований и доказанную успешность применения озона с электроактивированными водными растворами в сельском хозяйстве, соответствующие установки требуют совершенствования, так при применении в пчеловодстве необходимо снижение энергозатрат, повышение эффективности дезинфицирующего растворов, уменьшения времени на получение активированных сред.

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

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

Задачи исследования.

1. Разработать конструкцию проточного электроактиватора, объединяющую процессы диафрагменного электролиза водного раствора с одновременным барботированием анолита озоном.
2. Разработать математические модели, описывающие основные процессы при работе проточного электроактиватора, для их реализации в программном комплексе Comsol Multiphysics, учитывающие расход водного раствора и его проводимость, плотность потока массы озона и его растворимость в зависимости от температуры.
3. Провести компьютерное моделирование процесса барботирования потока анолита озоном в электроактиваторе и получить рациональные параметры и режимы его работы.
4. Обосновать и реализовать способ насыщения потока анолита озоном.
5. Изготовить усовершенствованный проточный электроактиватор водного раствора для профилактической обработки ульев и провести экспериментальные исследования по сопоставлению опытных данных с результатами моделирования.
6. Провести исследования по влиянию озоносодержащего анолита на выживаемость плесневых грибов и установить необходимые параметры раствора.
7. Разработать алгоритм и принципиальную электрическую схему управления электроактиватором.
8. Обосновать экономическую эффективность внедрения разработанного проточного электроактиватора на пасеке.

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

Предмет исследования — параметры и режимы работы проточного электроактиватора водного раствора, с получением анолита насыщенного озоном для профилактической обработки ульев; зависимость влияния

водородного показателя озоносодержащего анолита и степени насыщения его озоном на выживаемость плесневых грибов.

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

Научную новизну работы составляют:

- математические модели: барботирования потока анолита озоном; теплофизических процессов в электроактиваторе; обобщенная компьютерная модель для реализации в ПО Comsol Multiphysics;
- регрессионные зависимости влияния водородного показателя анолита насыщенного озоном и расхода воды через электроактиватор на выживаемость плесневых грибов;
- обоснованные параметры и режимы работы проточного электроактиватора для получения дезинфицирующего раствора анолита насыщенного озоном.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- математические модели барботирования потока анолита озоном и теплофизических процессов в электроактиваторе, позволившие получить обобщённую компьютерную модель для реализации в ПО Comsol Multiphysics, которые выявляют связи температуры анолита и концентрации растворенного в нем озона с параметрами и режимами работы электроактиватора;
- регрессионная модель влияния параметров процесса получения озонсодержащего анолита на выживаемость плесневых грибов, которая позволяет обосновать рациональные режимы работы проточного электроактиватора водного раствора;
- обоснованные параметры и режимы работы проточного электроактиватора для получения дезинфицирующего раствора анолита насыщенного озоном,

- позволяющие проектировать и изготавливать такое оборудование для проведения профилактических мероприятий на пасеке;
- разработанный и изготовленный проточный электроактиватор для получения дезинфицирующего раствора анолита насыщенного озоном, который повышает эффективность дезинфицирующего раствора, сокращает время на его получение и снижает риск попадания токсичных веществ в продукты пчеловодства.

Техническая новизна работы подтверждается патентами № 2802694, № 218329, № 2710569.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность результатов научного исследования подтверждается: методами компьютерного моделирования в ПО Comsol Multiphysics 6.1; обработкой экспериментальных данных с помощью ПО STATISTICA, использованием современной измерительной аппаратуры. Основные положения и выводы работы доложены и одобрены на ежегодных научно-практических конференциях преподавателей ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ по итогам НИР за 2019–2025 гг., а также на Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы в международном трансфере инновационных технологий» (12 февраля 2018 г., Пермь); на 20-й Международной научной конференции «Engineering for rural development» (26–28 мая 2021 г. Елгава, Латвия); на Международной научно-практической конференции «Малая энергетика: проблемы, задачи и перспективы» (15–16 июня 2023 г., Краснодар).

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

На защиту выносятся следующие положения:

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

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Болезни пчел и способы их лечения

Важной задачей каждой пасеки является получение качественной продукции и успешная ее реализация, для этого нужно понимать следующее: что влияет на активность пчелиных семей и их прирост. Для того что бы пасека эффективно выполняла свои функции необходимо учитывать такой показатель как медопродуктивность. Она зависит от количества пчел в улье, от общего количества меда, собранного пчелами за сезон и среднего числа вылетов, совершенных одной пчелой на медосбор в день. Продуктивность пасеки зависит не только от активности самих пчел, но и от пчеловода, который должен правильно ухаживать за ними. Особое внимание нужно уделять здоровью пчелиных семей, отдельно следить за здоровьем пчеламаток, так как она одна является продолжательницей рода. Также пчеловоду нужно правильно выбирать породу пчел, которая сможет в имеющихся климатических условиях показать максимум своих возможностей. Важным фактором является и расположение самой пасеки по отношению к кормовой базе.

Для повышения продуктивности пасеки, необходимо создать пчелиным семьям благоприятные условия для жизни, а именно: заблаговременно выставлять улья из зимовника, при этом пчелы, выставленные ранней весной могут дать больше расплода; подкармливать пчел сиропом, если семье не хватает меда; стимулировать работу пчел по сбору нектара, для этого следует своевременно проводить отбор медовых рамок из ульев; заблаговременно проводить дезинфекцию ульев, тем самым уменьшая риски возникновения, заболеваний пчелиных семей [126].

Заболевания пчелиных семей является одним из самых негативных факторов, который может значительно повлиять на снижение медопродуктивности пасеки. Поэтому главная задача пчеловода – сохранить здоровье пчел и поддержать чистоту в ульях, ведь без должного ухода не

будет получена качественная продукция. Естественно, возникают различные заболевания пчел, которые разделяют на незаразные и заразные (инвазионные, инфекционные). Чтобы не допустить развития заболеваний у пчел не обходимо правильно и вовремя проводить дезинфекцию ульев и инвентаря при обнаружении каких-либо признаков болезни.

Дезинфекция ульев должна осуществляться не реже одного раза в год в целях создания здоровых пчелосемей и получения качественной в санитарном отношении продукции пчеловодства. На данный момент существуют три вида дезинфекции: профилактическая, вынужденная и заключительная.

Профилактическая дезинфекция ульев, рамок и инвентаря проводится для того, чтобы снизить риск образования на пасеке различных инфекций, которые могут погубить пчелиную семью. Как правило, такую дезинфекцию проводят два раза в год: осенью для подготовки пчел к зиме и весной после зимнего периода.

При выявлении у пчел инфекционных или грибковых болезней (американский гнилец, аскосфероз, меланоз, паратиф, аскосфероз, септицемия, риккетсиоз, пчелиный паралич), проводится вынужденная дезинфекция ульев и пчелиной семьи для уничтожения инфекционного очага их заражения.

Заключительная дезинфекция осуществляется для закрепления результата проводимых обработок. На заключительном этапе необходимо тщательно обработать инвентарь пчеловода, чтобы в будущем опять не спровоцировать развитие инфекций.

Исходя, из выше сказанного дезинфекция является неотъемлемой частью содержания пчел, поэтому следует разобраться, какими болезнями могут болеть пчелы и как правильно проводить дезинфекцию.

Самыми распространенными болезнями пчел, которые встречаются, на территории России являются: американский и европейский гнильцы, аскосфероз, варроатоз, меланоз, нозематоз [71].

Американский гнилец является одним из самых опасных инфекционных заболеваний пчел, потому что при заражении пасеки возникает существенное снижение продуктивности пчелиных семей [17]. Возбудителем такой болезни является спорообразующая палочка бациллы ларве, она поражает печатный пчелиный расплод. Чаще всего болезнь появляется в летний период из-за жаркой погоды и перегревания пчелиного гнезда. Признаки болезни можно обнаружить при осмотре сотов с расплодом (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Фотография поражения расплода американским гнильцом

Для оздоровления пчелиной семьи от американского гнильца необходимо провести ряд процедур: изъять из больной семьи соты с расплодом и поместить их в семьи-изоляторы, убрать соты с медом и пергой для обеззараживания; провести дезинфекцию сотов, ульев, инвентаря, спецодежды, почвы; перевести больные семьи в новое гнездо; подкормка лечебным кормом. Для проведения дезинфекции ульев и рамок необходимо тщательная механическая очистка. После механической очистки всех поверхностей, осуществляется обжиг огнем паяльной лампой, до равномерного побурения. Также вместо обжига можно провести обработку раствором, содержащим 10 % перекиси водорода и 3 % муравьиной или уксусной кислоты, из расчета 1л на 1м². Для проведения обеззараживания сот и сушь используют раствор с содержанием 5 % однохлористого йода или раствором с 3 % перекиси водорода и 3 % муравьиной или уксусной кислоты.

Обеззараживание сот и сушь проводится посредством орошения раствором ячеек с обеих сторон, после чего промывается простой водой. Для оздоровления больных пчел им дают лечебный корм. В качестве лечебного корма может быть сахарный сироп с антибиотиком. Лечебные мероприятия от американского гнильца являются очень трудозатратными для пчеловода, поэтому, как и любую другую болезнь ее легче предупредить, чем лечить [23].

Европейский гнилец – это инфекционное заболевание, которому подвержен открытый пчелиный расплод в возрасте 3-4 дней, чаще всего проявляется в весенне-летний период. Возбудителем этого заболевания является один или несколько видов микробов: бацилла алвей, стрептококк плютон, стрептококк апис, бацилла орфеус. Источником заражения может служить не продезинфицированный инвентарь пчеловода и соты с содержанием больных личинок, а также мед и перга переставленные из больных семей к здоровым. Для лечения пчел используют лечебный подкорм в виде сахарного сиропа с лекарственным препаратом - антибиотиком (норсульфазол, тетрацилин, пенициллин). Дезинфекцию ульев осуществляют таким же образом, как и при заболевании, американским гнильцом. [23, 28].

Одной из самых опасных грибковых болезней пчелиных маток и рабочих пчел является меланоз, так как заболевание сопровождается поражением яичников и прекращением яйцекладки. Возбудитель болезни, широко распространенный в природе – плесневый гриб ауробазидиум, он может образовывать мицелий, состоящий из гифа или существовать как отдельная клетка. Такой возбудитель обладает высокой жизнеспособностью к физико-химическим факторам, но чувствителен к препаратам с содержанием йода. Семья, потерявшая матку, не может вывести новую, т. к. к моменту удаления матки из улья в семье не остаётся молодого расплода. Следует отметить, что эффективность методов лечения и мер борьбы с таким грибковым заболеванием на сегодняшний день не существует. Но, несмотря на это пчеловоды пытаются бороться с меланозом путем подкармливания

больных семей сахарным сиропом с добавлением антибиотиков нистатина или леворина в дозе 100 000 Е.Д. на 1 литр сиропа и осуществляют замену маток. Такой лечебный сироп дают по 0,5 литра на семью, 3 раза в день, с интервалом 3-5 дней, до исчезновения признаков болезни. Не менее важным при лечении меланоза остается дезинфекция ульев, которую проводят, как и при заболевании, американским гнильцом [57, 115].

Одной из инфекционных болезней взрослых пчел является гафниоз, вызванная энтеробактерией гафнией альвей, которая поражает кишечник пчел, выделяя экзотоксины. Чаще всего такое заболевание возникает в конце зимы и весной при холодной и дождливой погоде или высокой влажности в ульях. Также заражение здоровых пчел может произойти при блуждании пчел, использовании инфицированных ульев, переноса перги, соторамок. При подтвердившемся диагнозе на пасеку накладывают карантин и назначают больным пчелосемьям курс лечения с определенными дозами антибиотиков (стрептомицин, левомецин, неомицин). После чего проводят механическую очистку ульев, рамок, а затем орошают их горячим 3 % раствором едкого натра или теплым щелочным раствором формальдегида (3 % формальдегида и 3 % едкого натра). Соты для дальнейшего использования орошают с обеих сторон 1 % раствором однохлористого йода. Дезинфекции также подлежит и одежда пчеловода (халаты, лицевые сетки), ее кипятят в воде 10 мин, затем погружают в раствор с хлорамином на 4 часа, после чего промывают и просушивают [19, 23].

Колибактериоз пчел является инфекционной болезнью, которая сопровождается гибелью взрослых пчел. Возбудителем такой болезни является палочковая бактерия - эшерихия коли, которая при попадании в кишечник проникает в гемолимфу и начинает стремительно размножаться в ней, вызывая септицемию и, следовательно, гибель пчелы. Профилактика, меры борьбы и лечение такие же, как при гафниозе [23, 38, 39, 40].

Наиболее часто распространённой грибковой болезнью на пасеке является аскосфероз. Ей чаще всего подвержены трутневые и пчелиные

личинки 3-4 дневного возраста, которые после гибели превращаются в мумифицированные трупы, напоминающие по внешнему виду кусочки мела или извести (рис. 1.2). Возбудителем такого заболевания является гриб аскоффера, который попадая в кишечник личинки с медом и пергой размножается в ней и постепенно покрывает личинку белым налетом. Наиболее часто размножение гриба аскоффера осуществляется в ослабленных пчелиных семьях при колебании температуры и высокой влажности воздуха в пчелином гнезде, плохой вентиляции, при недостатке белка в корме, частом применении антибиотиков, что в свою очередь может снизить способность пчелиной семьи противостоять возбудителю.



Рисунок 1.2 – Фотографии личинок пораженных аскофферозом

Для лечения данного заболевания создано огромное количество препаратов, но наиболее популярным препаратом для лечения аскоффероза пчел является антибиотик нистатин. Порошок нистатина добавляют в лечебный раствор для опыления сот с пчелами или добавляют в подкорм. Также при обнаружении заболевания проводят тщательную механическую очистку рамок, ульев и других деревянных поверхностей, после чего обрабатывают раствором 10 % перекиси водорода и 0,5 % муравьиной кислоты или щелочным раствором формальдегида, содержащим 15 % формальдегида и 5 % едкого натра. Инвентарь пчеловода также подвергается очистке и обработке, например, щелочным раствором формальдегида, содержащим 10 % формальдегида и 5 % едкого натра, после инвентарь промывают водой и сушат [2].

Помимо дезинфекции, проводимой в лечебных и профилактических целях, также существует необходимость ежегодной дезинфекции пчелиных ульев после зимовки [18]. Как правило, ее проводят весной после зимнего периода, когда пчелиные ульи и рамки из-за обильного воздействия на них влаги подвергаются заражению плесневыми грибами (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Фотографии плесени на стенках ульев и рамках после зимовки [11]

Из вышеперечисленных инфекционных и грибковых болезней можно сделать вывод, что при большинстве заболеваний, дезинфекция ульев, сот, рамок проводится с помощью растворов с токсичными для человека химическими веществами, например формальдегидом. Лечение больных пчел осуществляется преимущественно антибиотиками, которые при неправильном применении или чрезмерном их использовании могут нанести вред потребителям пчеловодческой продукции, а также вызвать адаптацию болезнетворных микроорганизмов, что приведет к увеличению применяемой дозы и усугублению эпизоотической ситуации. Поэтому необходимо

провести поиски других существующих экологически чистых способов обработки, действие которых будет безопасным для человека и пчел [135, 138].

Так, существует множество лечебных рецептов на основе растений и трав, которые можно применять для профилактики заболеваний и лечения самих пчел. Например, для борьбы с такими заболеваниями как аскосфероз или известковый расплод, можно использовать чеснок. Кроме этого, можно воспользоваться свежей травой пижмы и полыни, их тоже укладывают под холстики из расчета 200-250 грамм на гнездо. Применяют этот метод в активный период жизнедеятельности пчел, кроме медосбора [33]. В случае, если на пасеки обнаружено инфекционное заболевание американский гнилец, то самое популярное народное средство в борьбе с ним является чистотел. Для проведения дезинфекции и лечения пчел необходимо использовать отвар из измельченного сырья. Осуществляется опрыскивание им не только пчел, но и всех поверхностей ульев [53]. При обнаружении на пасеке варроатоза, можно воспользоваться порошком сухой хвои или ели (хвойная мука) для опыления сот с пчелами. Так как клещи не переносят хвойный запах, примерно через 10-12 часов они теряют способность к свободному перемещению и осыпаются на дно улья. Кроме того, при борьбе с варроатозом можно воспользоваться пихтовым маслом, которым смазывают листок пергамента по размеру дна улья в расчете 1-2 мл на одно гнездо.

Но все же применение таких экологически чистых (природных) методов лечения пчел мало эффективно и имеет ряд недостатков. Главный из которых заключается в их доступности, т.к. произрастают такие растения не всегда вблизи пасеки, поэтому собрать их и приготовить нужное средство быстро не получится. Применение таких способов лечения скорее должно служить дополнительным методом к основному способу лечения пчел [73].

Помимо народных средств существует ряд электротехнологических способов, с помощью которых можно бороться с заболеваниями пчел и проводить дезинфицирующие мероприятия.

1.2 Существующие электротехнологические способы повышения эффективности дезинфекции и стимуляции развития биологических объектов

Применяемые в настоящее время электротехнологии в сельском хозяйстве могут предложить большой выбор различных экологически чистых способов дезинфекции и стимуляции развития биологических объектов. Среди них: УФ и ИК облучение, обработка импульсными электрическими зарядами, электроаэрозольная обработка и т.п. Электротехнологическому воздействию подвергается большинство объектов сельского хозяйства: растения, животные, почва, различные газообразные и жидкие среды. Это обусловлено в первую очередь безопасностью применения данных способов, как для самих объектов производства, так и для человека, которая была неоднократно доказана. Поэтому в связи с большим распространением различных химических и токсичных препаратов в сельском хозяйстве (антибиотиков, пестицидов и т.п.), в частности в пчеловодстве, применение данных методов приобретает все большую актуальность. На сегодняшний день их развитием занимаются многие научные предприятия: ФГБОУ ВО РГАТУ имени П.А. Костычева (г. Рязань), Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ (г. Зерноград), ФГБОУ ВО Удмуртский ГАУ (г. Ижевск), ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва), ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ (г. Ставрополь), ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ им. И.Т. Трубилина (г. Краснодар) и др. [27, 43, 52, 64, 78-80, 98, 110, 114, 116, 118, 119, 121, 123]. Среди отечественных ученых, занимающихся, в том числе и проблемой использования электротехнологических способов для дезинфекции сельскохозяйственных объектов, можно выделить: Сторчевой В.Ф., Степанчук Г.В., Кондратьева Н.П., Юдаев И.В., Лекомцев П.Л. и др. [27, 43, 49, 52, 112-114, 116-119, 121]. Ими разработаны устройства, использующие различные электрофизические факторы (СВЧ, лазерное и ультрафиолетовое излучение, ионизация воздуха, озонирование, магнитные

поля) на продукты и объекты АПК. Среди них, по нашему мнению, наиболее сильным окислительным действием на патогенную микрофлору владеет озон. Он обладает не только обеззараживающим действием, но в малых количествах, как и любой яд, данный газ стимулирует развитие биологических организмов, так как при воздействии на живые клетки, активизирует протекание биохимических процессов [103]. Его окислительные свойства нашли широкое применение в сельском хозяйстве и промышленности: для дезинфекции животноводческих помещений, теплиц, обработки яиц перед их загрузкой в яйцесклады, обеззараживания воды, хранения овощей и фруктов и т.п. [1, 26, 32, 60, 109].

Существует несколько способов получения озона: с применением УФ облучения, электролитический способ и при помощи электролиза в барьерном разряде [99]. Наибольшее распространение, в частности в сельском хозяйстве, получили устройства барьерного типа.

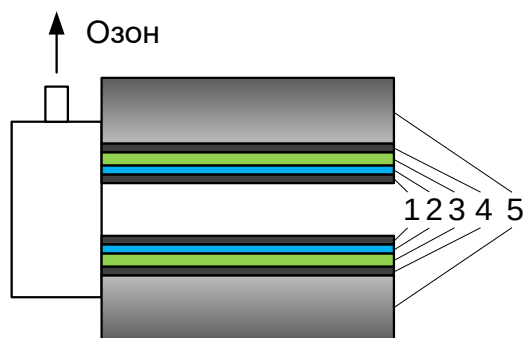
Озонаторы можно разделить на бытовые и промышленные [84]. Бытовые озонаторы обычно имеют маленькую мощность и компактные размеры. Производительность таких озонаторов по озону составляет 1-10 г/ч. В настоящее время на российском рынке имеется множество производителей бытовых озонаторов, благодаря которым можно осуществлять очистку воды и произвести дезинфекцию тары, небольших помещений (рис. 1.4).



а) озонатор RawmidModern Rmo-04, б) озонатор M600 Expert, в) озонатор Pozitron Q15-A
Рисунок 1.4 – Изображение некоторых бытовых озонаторов

Чаще всего это озонаторы трубчатого типа в конструкции, которых отсутствует диэлектрическое покрытие у одного из электродов (рис. 1.5).

В таких аппаратах возможен вынос металла электрода вместе с озоном, что ограничивает применение таких установок в пищевых производствах.



1 – внутренний электрод, 2 – разрядный промежуток, 3 – кварцевая или керамическая трубка, 4 – наружный электрод, 5 – радиатор

Рисунок 1.5 – Структурная схема трубчатого озонатора [16]

Наибольшее распространение в сельском хозяйстве, в частности в пчеловодстве, получили озонаторы пластинчатого типа. Их электроды и диэлектрические барьеры выполнены плоскими, что упрощает их создание. С помощью озонаторов можно снизить влажность, улучшить газовый состав внутриульевого воздуха и снизить количество болезнетворных микроорганизмов и тем самым создать благоприятные условия для развития пчелиных семей [102]. Известны исследования Д.А. Овсянникова, С.А. Николаенко, С.В. Оськина, А.А. Лозы, Д.А. Нормова по внедрению данных установок в пчеловодстве для дезинфекции ульев, пчелоинвентаря и проведения лечебно-профилактических мероприятий на пасеке. Ими были получены параметры обработок озоном пчелиных ульев от бактериозов и микозов пчел [54, 61, 63, 66, 95].

Не смотря на положительный эффект от озонирования при профилактике и лечении болезней пчел данный газ имеет ряд недостатков при его использовании на пасеке. Он опасен для дыхательной системы человека. ПДК составляет $0,1 \text{ мг/м}^3$. И, хотя озон очень быстро распадается в результате протекания гомо- и гетерогенных реакций, что обуславливает его

экологичность, концентрации данного газа для применения в пчеловодстве превышают ПДК и начинаются от 50 мг/м³ и более в зависимости от назначения обработки. Так, например, для борьбы с микозами предлагается обрабатывать пчелиные улья концентрацией 500 мг/м³ в течение 90 минут [54]. Для борьбы с варроатозом и вовсе использовать концентрации 15000 мг/м³ [88]. Поэтому необходимо тщательно контролировать технику безопасности. К недостаткам следует также отнести непродолжительность воздействия газа на микроорганизмы. Например, в водоподготовке, для повышения надежности и безопасности качества воды в санитарно-гигиеническом отношении по существующим в Российской Федерации стандартам озонирование применяют в комплексе с другими способами обеззараживания, которые обеспечивают необходимое дезинфицирующее последствие – хлорирование и т. д. [67].

Также в качестве немедикаментозного способа профилактики и лечения пчелиных заболеваний хорошо себя зарекомендовали водные электроактивированные растворы с разным уровнем водородного показателя (рН): анолит (водный раствор, имеющий рН ниже 7) и католит (водный раствор имеющий рН выше 7). В составе анолита содержатся радикалы атомарного кислорода, озона, хлора, хлорноватистой кислоты, перекиси водорода, гипохлорита, которые очень быстро нейтрализуют самые устойчивые формы возбудителей заболеваний. Таким образом, анолит обладает антимикробным действием [41, 77]. Раствор католита напротив обладает биологической активностью, является стимулятором роста и развития жизнедеятельности живого организма и растений [124].

Для получения электроактивированных растворов используют чаще всего диафрагменные электролизеры. В конструкции таких установок можно выделить несколько основных элементов: электроды – положительный и отрицательный и полунепроницаемая диафрагма между ними. Диафрагма делит электролизер на катодную и анодную камеры, которые заполняются электролитом и в которых получают соответствующие растворы. В

большинстве случаев в качестве электролита используют растворы солей, водные растворы кислот или щелочей [145].

Использованию электроактивированных растворов в сельском хозяйстве посвящено множество исследований, т.к. большинство технологических процессов в нем так или иначе связаны с применением водных растворов. Так, например, в пчеловодстве известен способ применения электроактивированных растворов на пасеке [87]. Анолит и католит получают путем электролиза воды, в которую перед обработкой добавляют хлорид натрия. Анолит с pH 5-8,2 используют для обработки пчел и соторамок методом мелкокапельного орошения, а также для поения и кормления пчел. Католит с pH 7,5-9,5 также может быть использован для поения пчел. К недостаткам способа следует отнести необходимость добавления солей в исходную воду, что может привести к солевому токсикозу у пчел [9]. Поэтому, по нашему мнению, для получения анолита и католита следует использовать водопроводную воду без добавления солей, как например, в источниках [90, 91].

Существуют исследования говорящие об эффективности применения в борьбе с аскосферозом простой воды, которую барботировали озоном по сравнению с озоновоздушной обработкой ульев тем же газом. При этом процент степени обеззараживания вырос на 9,5% [8].

Так как в анолите, как уже было сказано образуются хлорсодержащие вещества, то видится целесообразным усилить дезинфицирующие свойства раствора озоном. При этом часть озона при его барботаже неизбежно будет разрушена в воде, что снизит его опасность для человека. Однако в ней будут получены другие сильные окислители – перекись водорода H_2O_2 и кислород O_2 [44]:



Стоит отметить, что при диафрагменном электролизе воды также может образовываться озон в результате реакции на аноде [86]:



Но получаемые при этом концентрации газа очень малы, что еще раз доказывает необходимость усиления дезинфицирующих свойств, получаемых при электролизе анолитов. Согласно [16] хлор, хлорсодержащие вещества, образующиеся при диафрагменном электролизе водных растворов и озон имеют разное воздействие на патогенную микрофлору, что позволяет сделать вывод о том, что добавление озона в получаемый анолит расширяет его дезинфицирующие свойства (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Эффективность уничтожения микроорганизмов различными дезинфицирующими средствами

Дезинфектант	Механизм
хлор	Ингибирование ферментов, необходимых для деления ДНК
хлор	Изменение оболочки клетки окислением аминокислот
ClO ₂	Разрушение синтеза белка
ClO ₂	Разрушение оксидазы глюкозы
O ₃	Разрушение мембран
O ₃	Реакция с глутатионом
O ₃	Повреждение хромосом ДНК
радикалы ОН	Разрыв спирали ДНК
радикалы ОН	Реакция с нуклеиновыми кислотами
радикалы ОН	Деформация поверхности клеток, разрыв оболочки

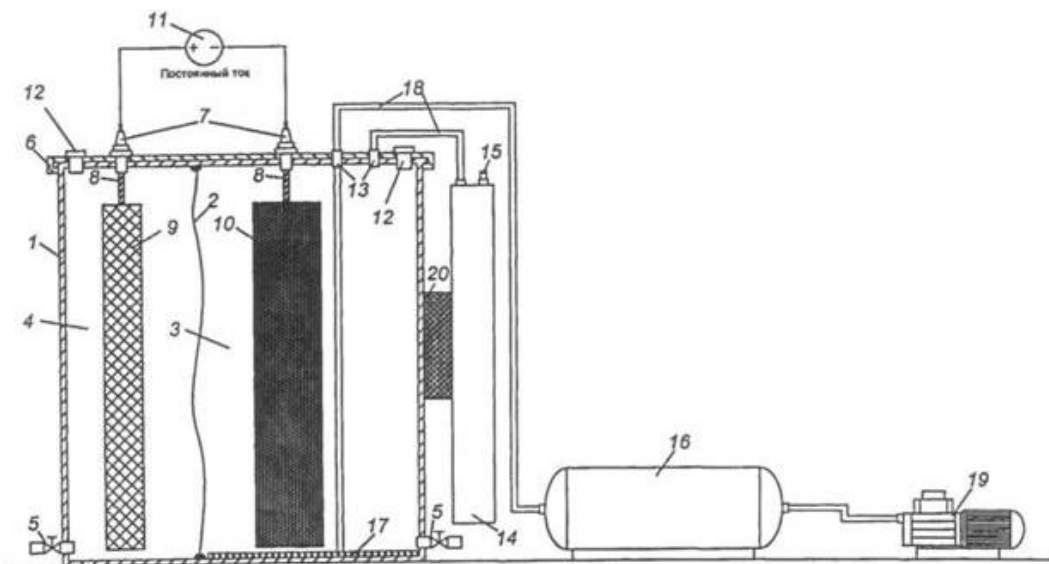
Таким образом, технологии озонирования и получения электроактивированных растворов наиболее актуальны в пчеловодстве вследствие их экологической чистоты, простоты установок, доступности для пчеловодов. Следует рассмотреть исследования в данной области для модернизации установок и ускорения процесса их внедрения в пчеловодстве.

1.3 Особенности применения технологий озонирования и электроактивации водных растворов в пчеловодстве

Известна установка, комбинирующая диафрагменный электролизер и озонатор (рис. 1.6) [89]. Главным недостатком такой установки является применение анода из угля, частицы которого будут переходить при

1 – корпус; 2 – диафрагма; 3 – анодная камера; 4 – катодная камера; 5 – сливной кран; 6 – крышка; 7 – изолятор; 8 – соединительный стержень; 9 – стальной катод; 10 – угольный анод; 11 – источник постоянного тока; 12 – заливное отверстие; 13 – соединительный штуцер; 14 – деструктор озона; 15 – выпускной клапан; 16 – электроозонатор; 17 – распределитель озона; 18 – трубопровод; 19 – компрессор; 20 – соединительная пластина

Рисунок 1.6 – Схема установки для получения дезинфицирующего раствора анолита барботированного озона согласно [89]



1 – корпус; 2 – диафрагма; 3 – анодная камера; 4 – катодная камера; 5 – сливной кран, 6 – крышка; 7 – изолятор; 8 – соединительный стержень; 9 – стальной катод; 10 – угольный анод; 11 – источник постоянного тока; 12 – заливное отверстие; 13 – соединительный штуцер; 14 – деструктор озона; 15 – выпускной клапан; 16 – электроозонатор; 17 – распределитель озона; 18 – трубопровод, 19 – компрессор; 20 – соединительная пластина

Рисунок 1.6 – Схема установки для получения дезинфицирующего раствора анолита барботированного озоном согласно [89]

Автор первоначально проводил электролиз водопроводной воды с помощью бытового непроточного диафрагменного электролизера позволяющего получать до 0,4-0,5 л каждого раствора за один цикл работы установки. Затем полученный анолит сливался в другую емкость и барботировался озоном от 1-ой до 3-х минут. В общей сложности процесс получения полу литра дезинфицирующего раствора занимал около 15 минут. В исследовании был сделан акцент на получении раствора анолита с минимальным значением pH, которое на используемой автором установке достигало уже к 10 минуте электролиза значения равного 3,4 (рис. 1.7).

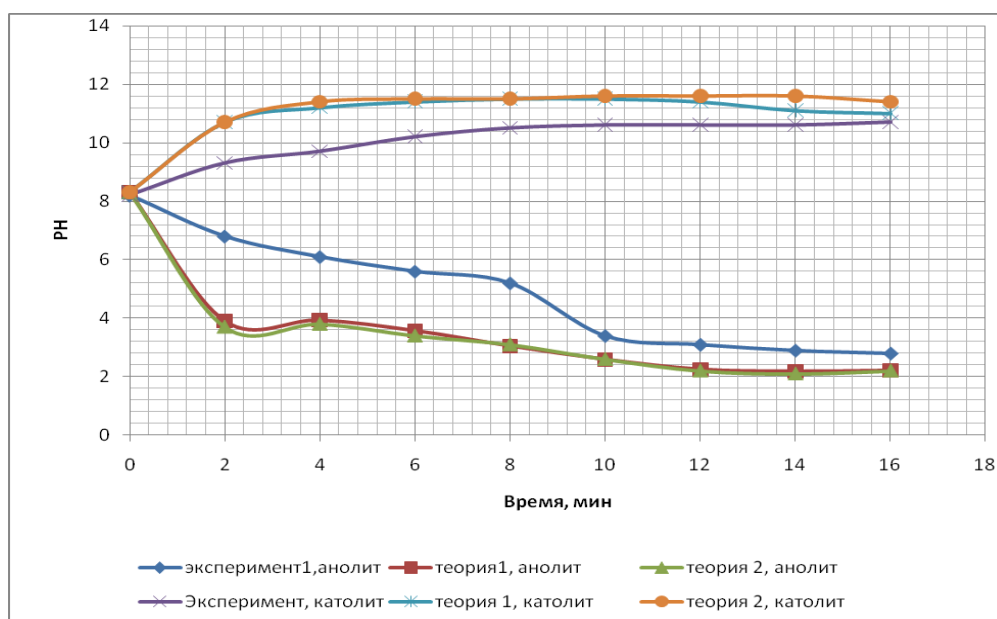


Рисунок 1.7 – Графики изменений pH анолита и католита во времени, полученных теоретически и экспериментально при работе непроточного электроактиватора [16]

В то же время в работе говорится о том, что решающим фактором в достижении максимальных обеззараживающих свойств анолита является образование в анолите хлорсодержащих веществ. Согласно исследованиям автора, основной процесс их формирования из ионов хлора заканчивается к 5-8 минуте (рис. 1.8).

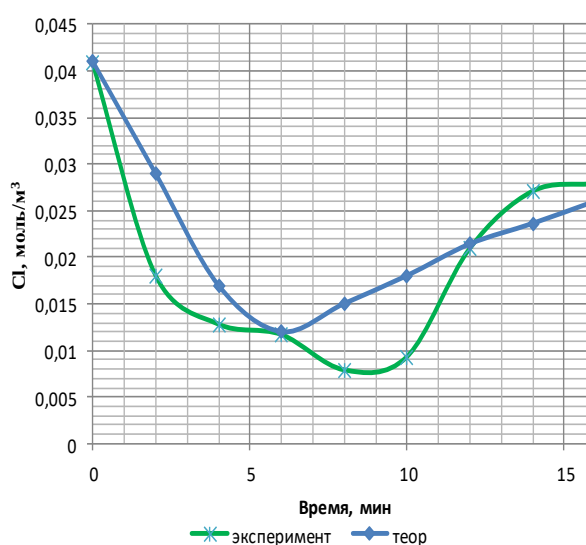


Рисунок 1.8 – Графики изменений концентраций хлора во времени в анодной камере полученных теоретически и экспериментально [16]

При этом pH раствора на 5 минуте в 2 раза выше, чем на 10-ой – около 6-ти (рис. 1.7). Это говорит о том, что главный недостаток установки – малая производительность, который может быть устранен за счет использования проточного диафрагменного электролизера воды, рассчитанного на получение анолита с pH равным 5-6. При этом согласно полученным автором данным должен сохраниться дезинфицирующий эффект. Электрическая энергия проточной установки при получении анолита с таким pH гораздо меньше, чем при получении анолита с $\text{pH} = 3,4$ и ниже.

Таким образом, для получения озоносодержащего анолита в потоке, необходим электроактиватор состоящий из: проточного диафрагменного электролизера водных растворов, а также смесителя озона с водой, который должен быть установлен перед анодной камерой.

На сегодняшний день наибольшее распространение получили два типа электролизеров или активаторов. Первые из них требуют добавления солей в исходную воду и отличаются высокой стоимостью, сложной конструкцией и не высокой производительностью (рис. 1.9). К ним можно отнести установки разработанные В.М. Бахиром [120].

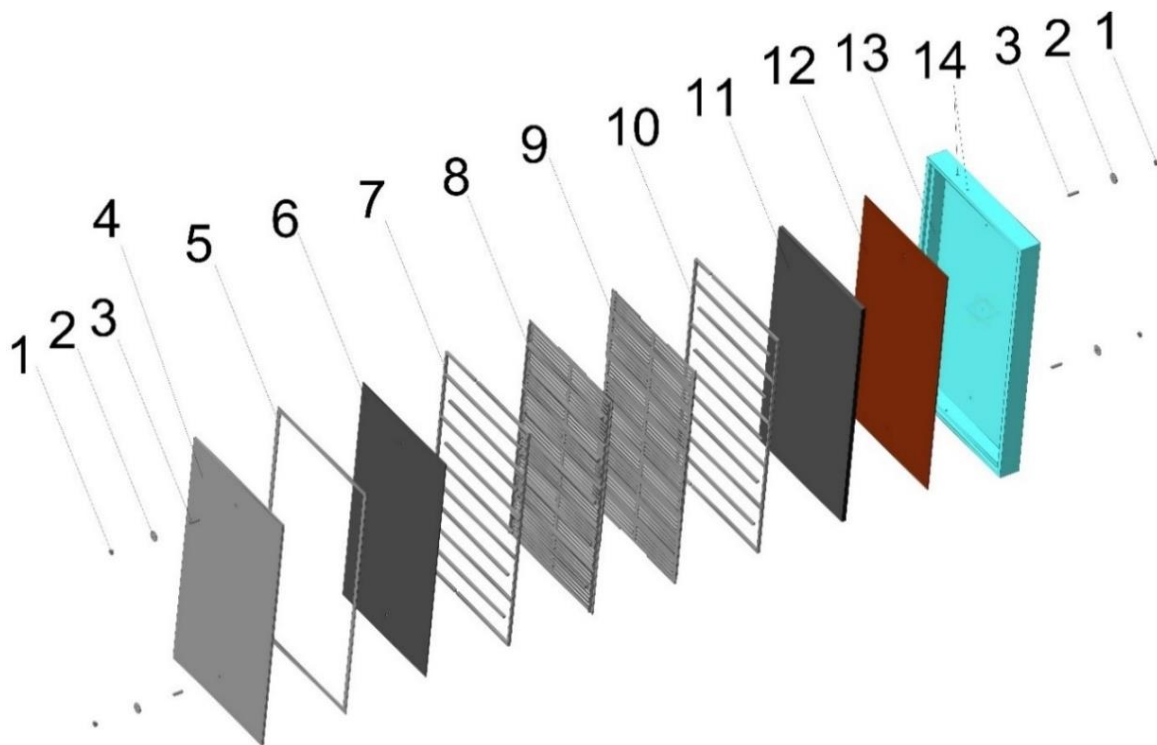


Рисунок 1.9 – Электролизеры воды, требующие добавления воды в исходную воду [120]

По нашему мнению, католит получаемый одновременно с анолитом тоже необходимо использовать иначе половина затрачиваемой энергии на получение электроактивированных растворов будет расходоваться в пустую.

Как было сказано выше католит можно использовать для поения пчел, в том числе и зимой с помощью водонагревателей [136]. Но высококонцентрированный щелочной раствор, получаемый на установках требующих добавления солей в исходную воду вреден для насекомых. Требуется дополнительная операция на его разбавление водой.

Ко вторым типам электролизерам относятся установки, не требующие обязательного добавления солей в исходную воду. Они отличаются не высокой стоимостью, но требуют больших затрат электроэнергии по сравнению с другими электролизерами. К ним можно отнести установки, разработанные и запатентованные в Кубанском ГАУ [94]. Их конструкция представлена на рис. 1.10. Анодная и катодная камеры в таких электролизерах выполнены в виде зигзагообразного канала, что позволяет удлинить путь протекания, как жидкости, так и пузырьков озона в ней.



1 – гайка, 2 – шайба, 3 – винт, 4 – крышка, 5 – резиновая прокладка, 6 – анод, 7 – зигзагообразный канал анодной камеры, 8 – первый держатель диафрагмы, 9 – второй держатель диафрагмы, 10 – зигзагообразный канал катодной камеры, 11 – катод, 12 – резиновая подушка, 13 – корпус, 14 – отверстия для подачи исходной воды

Рисунок 1.10 – Конструкция проточного электролизера, разработанного в Кубанском ГАУ (диафрагма и выходные отверстия для анолита и католита не показаны)

За счет того, что для получения дезинфицирующего раствора предлагаемым методом, согласно литературному обзору, не требуется получение низкого pH и достаточно pH = 5-6, то возможно снизить энергозатраты на получение дезинфицирующего раствора. Для этого также возможно снижение подачи воды в установку, что увеличит время пребывания озона в канале анодной камеры.

По нашему мнению, данные электролизеры наиболее приемлемы для использования на пасеке вследствие их невысокой стоимости, простоты конструкции. При этом подача озона в установку может быть осуществлена различными способами, наиболее простым, на наш взгляд, является его подача в трубопровод для подачи исходной воды в анодную камеру.

Стоит также отметить, что в [16] не представлено сведений о влиянии pH анолита, концентрации озона и диаметра пузырьков на растворимость газа в растворе. Тогда как, размеры тех же пузырьков газа, а именно площадь межфазного контакта между газом и жидкостью может оказывать существенное влияние на растворение озона в анолите. Как известно массопередача газа из пузырька в жидкость описывается законом Генри [37]:

$$-dm/dt = kF(c_p - c_e) \quad (1.3)$$

где m – масса растворенного озона, г; t – время, с; k – коэффициент массопередачи, см/с; F – площадь поверхности пузырька озона, см²; c_p и c_e – равновесная концентрации озона в воде и концентрация растворенного в ней озона соответственно, г/см³.

Из формулы (1.2) видно, что скорость растворения озона в воде зависит от времени пребывания газа в ней t , коэффициента массопередачи k , площади пузырей газа в воде F и концентрации озона в газе c_e . Данные параметры следует учитывать при рассмотрении процесса барботирования потока анолита озоном. Также известны исследования, в которых говорится о влиянии pH раствора на растворимость озона в нем [30]. По всей видимости, это влияние связано с разным взаимодействием озона с ионами водорода H^+ и гидроксида OH^- , а также с разным их количеством при том или ином

уровне pH водного раствора. Согласно рис. 1.11 в диапазоне pH анолита от 3 до 6 коэффициент растворимости озона R_t в воде не изменяется и остается высоким по сравнению с его значением в щелочной среде.

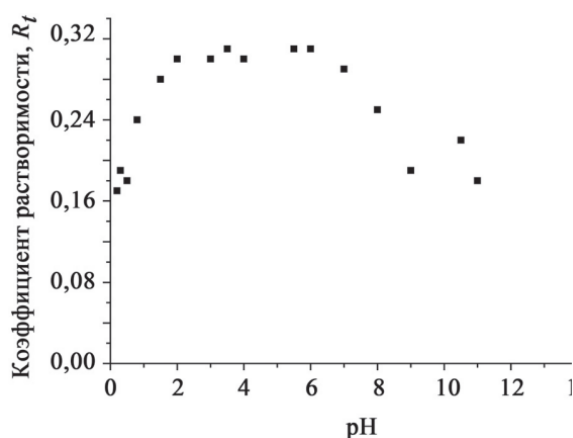


Рисунок 1.11 – Зависимость коэффициента растворимости от pH [30]

Это с одной стороны позволяет не учитывать зависимость растворимости озона в данном диапазоне pH, а с другой стороны говорит о необходимости рассмотреть реакции разложения озона в воде с участием ионов H^+ и OH^- . Известно, что озон быстрее распадается в щелочной среде, нежели в кислой (рис. 1.12), что подтверждает эффективность барботажа именно анолита. Причем согласно [12] озон никак не взаимодействует с ионами хлора и тем самым не снижает дезинфицирующее действие анолита.

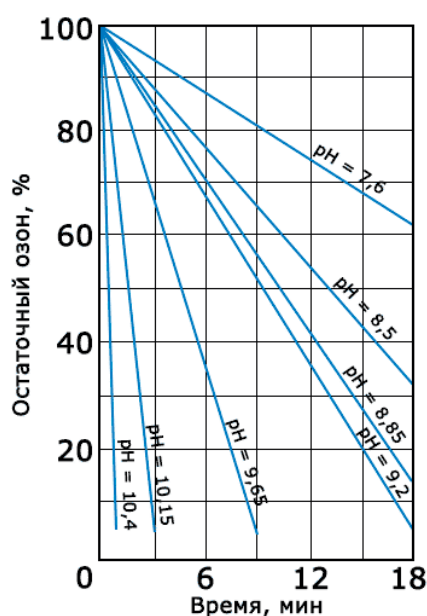


Рисунок 1.12 – Зависимость скорости распада озона в воде от pH [105]

Также в литературных источниках отсутствуют исследования по изучению влияния озоносодержащего анолита на плесневые грибы, которые наряду с бактериями влияют на медопродуктивность пчел. Так известны исследования, проводимые на юге России (в Краснодарском крае) в которых показано, что с увеличением количества в кишечном тракте пчел карпатской породы энтеробактерий, стафилококков, псевдомонад, дрожжей и плесневых грибов ухудшается анатомическое состояние кишечника пчел, снижается их воспроизводительная активность и медопродуктивность (табл. 1.2).

Таблица 1.2 – Кишечная микрофлора пчел в конце зимовки в феврале [108]

Микроорганизмы	Коэффициент корреляции	Микроорганизмы	Коэффициент корреляции
Энтеробактерии	-0,83	Псевдомонады	-0,51
Лактобактерии	0,85	Дрожжи	-0,44
Стафилококки	-0,64	Плесневые грибы	-0,56
Энтерококки	0,75		

Коэффициент корреляции в табл. 1.2 говорит об отрицательном влиянии на кишечник пчел энтеробактерий, стафилококка, псевдомонад и плесневых грибов (кроме лактобактерий и энтерококков). Если в [16] есть сведения о влиянии озоносодержащего анолита на энтеробактерии типа кишечной палочки, то на плесневые грибы такой информации нет.

Так как озон является сильным окислителем, то его концентрация в получаемом анолите будет со временем падать, что будет снижать дезинфицирующую активность раствора. Следовательно, насыщение анолита озоном в потоке сократит время подготовки и не только ускорит процесс обработки ульев, но и позволяет максимально эффективно использовать данный дезинфицирующий раствор, т.к. время между его получением и использованием сокращается.

1.4 Выводы и задачи исследований

Проведенный литературный анализ в области применения экологически чистых способов дезинфекции в пчеловодстве показал, что для получения эффективного дезинфицирующего раствора наиболее перспективным является использование технологий озонирования и диафрагменного электролиза водных растворов. Однако до сих пор отсутствует проточная установка для получения озоносодержащего анолита из водопроводной воды [132]. Такая установка позволила бы повысить активность данного раствора, расширить его дезинфицирующие свойства и сократить время обработки пчелиных ульев.

Согласно имеющимся на сегодняшний день исследованиям диафрагменного электролиза воды в непроточных установках, для влияния на болезнетворные микроорганизмы не требуется создавать низкие уровни pH. Для этого, по нашему мнению, достаточны растворы с pH от 5 до 6, что позволяет снизить энергозатраты при работе проточного электроактиватора, но требуются дополнительные исследования таких установок в пределах pH от 3 до 6 для определения рациональных параметров обработки пчелиных ульев и пчелоинвентаря. Также требуются дополнительные исследования влияния озоносодержащего анолита на выживаемость плесневых грибов. В частности, рода грибов *Penicillium*, которые согласно [108] являются доминирующими в пчелином улье с марта по июль.

В имеющихся работах, посвященных получению озоносодержащего анолита, отсутствуют сведения о влиянии на концентрацию растворенного в анолите озона концентрации исходного газа, температуры среды, реакций разложения озона в воде, что может сильно сказаться на характеристиках получаемых дезинфицирующих растворов.

Проблема. Имеющиеся в наличие электроактиваторы водных растворов для проведения дезинфицирующих мероприятий на пасеке не позволяют получать растворы озоносодержащего анолита непосредственно в

потоке прохождения жидкости через электролизер, что снижает его последующую дезинфицирующую активность и повышает трудоемкость его получения.

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

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

Задачи исследования.

1. Разработать конструкцию проточного электроактиватора, объединяющую процессы диафрагменного электролиза водного раствора с одновременным барботированием анолита озоном.
2. Разработать математические модели, описывающие основные процессы при работе проточного электроактиватора, для их реализации в программном комплексе Comsol Multiphysics, учитывающие расход водного раствора и его проводимость, плотность потока массы озона и его растворимость в зависимости от температуры.
3. Провести компьютерное моделирование процесса барботирования потока анолита озоном в электроактиваторе и получить рациональные параметры и режимы его работы.
4. Обосновать и реализовать способ насыщения потока анолита озоном.
5. Изготовить усовершенствованный проточный электроактиватор водного раствора для профилактической обработки ульев и провести экспериментальные исследования по сопоставлению опытных данных с результатами моделирования.

6. Провести исследования по влиянию озоносодержащего анолита на выживаемость плесневых грибов и установить необходимые параметры раствора.
7. Разработать алгоритм и принципиальную электрическую схему управления электроактиватором.
8. Обосновать экономическую эффективность внедрения разработанного проточного электроактиватора на пасеке.

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

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

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БАРБОТИРОВАНИЯ ПОТОКА АНОЛИТА ОЗОНОМ

2.1 Разработка конструкции проточного электроактиватора и обоснование выбора теоретических положений, описывающих основные процессы

Для моделирования процесса барботирования потока анолита озоном необходимо рассмотреть следующие процессы:

- массообмен между пузырьками озона и водой в анодной камере;
- течение многофазного потока состоящего из пузырей газа и воды в анодной камере, а также течение воды в катодной камере;
- перенос массы растворенного озона в воде и его реакции с ионами водорода и гидроксида, а также образование других веществ, например перекиси водорода и кислорода в анодной камере.

Необходимо рассмотреть также теплофизические процессы в электроактиваторе, связанные с протеканием электрического тока и процесс нагрева установки, что в свою очередь ведет к изменению массопередачи озона в воду.

Для проведения компьютерного моделирования необходимо задать в первую очередь геометрическую модель, в области которой и будет производиться расчет. На основании предварительных исследований и предыдущего анализа нами была разработана геометрическая модель электроактиватора для профилактической обработки ульев в ПО Comsol Multiphysics. Общий вид активатора с нанесенными на него размерами (указаны в метрах) показан на рис. 2.1. Размеры представленной модели совпадают с размерами большинства электроактиваторов, разработанных ранее в Кубанском ГАУ. Так, например, толщина обоих каналов установки, как и в работах [48, 128] составляет 0,004 м. Смеситель газа с анолитом в модели представлен в виде тройника с отверстиями для подачи воды и озонозвоздушной смеси. Диаметр отверстия для входа воды составляет 0,19 м

(что соответствует трубопроводу диаметром $\frac{3}{4}$ дюйма). Диаметр отверстия для подачи потока озонозвоздушной смеси в анодную камеру составляет 0,003 м (что соответствует диаметру трубопроводов, используемых в большинстве бытовых озонаторов).

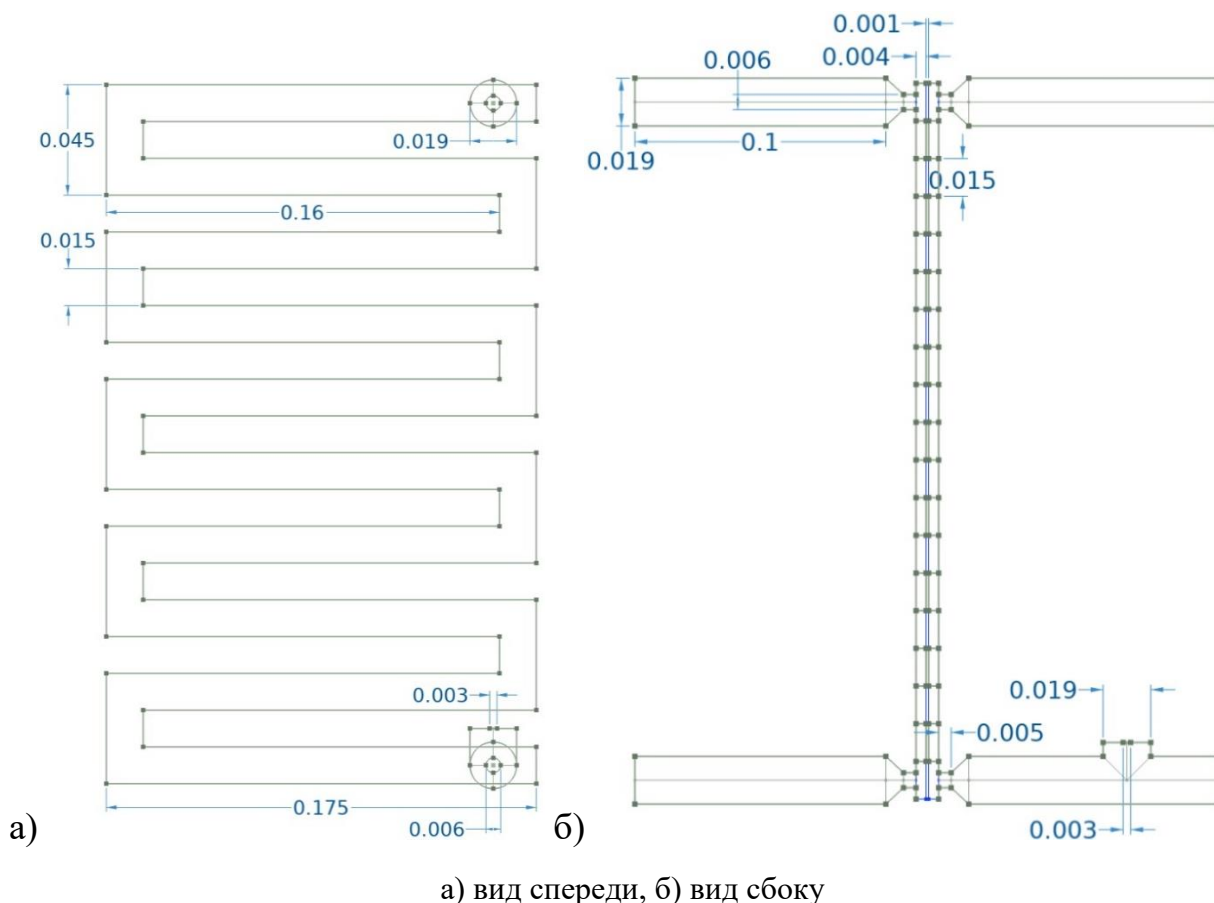


Рисунок 2.1 – Чертеж общего вида модели электроактиватора для профилактической обработки ульев

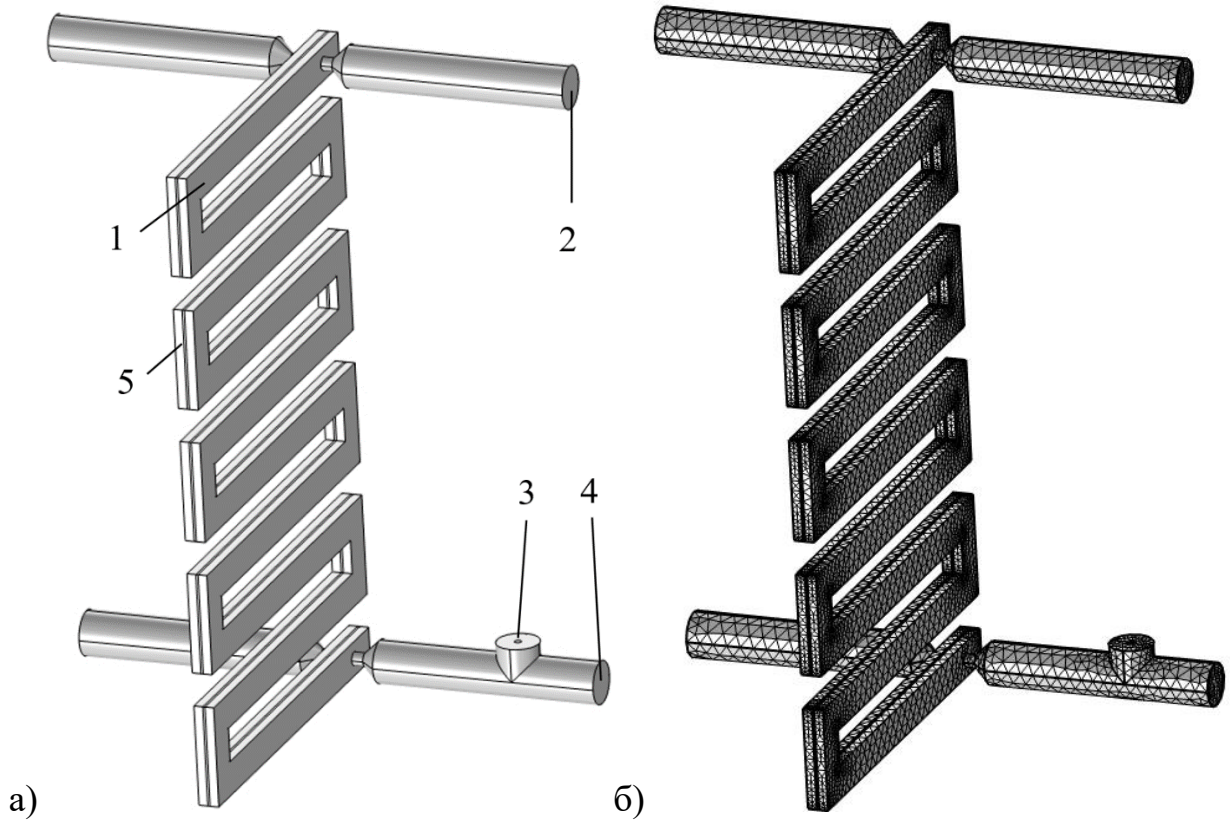
На рисунке 2.2 (а) показана 3D модель электроактиватора. Она представлена только областью, которую занимает вода.

Для проведения последующего компьютерного моделирования процесса барботирования анолита озонем была построена сетка, состоящая из тетраэдров. Общее количество элементов сетки составило 101 тысяча (рис. 2.2, б).

Наибольший интерес вызывает процесс массообмена между пузырьками газа и анолитом в установке. Перенос газа в воду в соответствии с двухпленочной теорией описывается следующим уравнением [25]:

$$\frac{\partial \varphi_g \rho_g}{\partial t} + \nabla(\varphi_g \rho_g u_g) = -m_{gl} \quad (2.1)$$

где φ_g – объемная доля, занимаемая газом в анодной камере, м³/м³; ρ_g – плотность газа, кг/м³; u_g – скорость газа в воде, м/с; m_{gl} – скорость массопередачи газа в жидкость, кг/(м³·с).



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

Рисунок 2.2 – Изображение геометрической модели электроактиватора для профилактической обработки ульев (а) и построенная расчетная сетка (б)

Скорость массопередачи m_{gl} определяется согласно (1.2) с помощью закона Генри, который для рассматриваемого случая выглядит следующим образом:

$$m_{gl} = k(c_p - c_{O_3})Ma \quad (2.2)$$

где k – коэффициент массопередачи, м/с; c_p – равновесная концентрация озона в воде, моль/м³; c_{O_3} – концентрация растворенного озона в воде,

моль/м³; M – молярная масса озона, равная 47,998 г/моль; a – площадь поверхности раздела фаз на единицу объема, м²/м³.

Площадь поверхности раздела фаз на единицу объема рассчитывается по формуле:

$$a = (4n\pi)^{1/3} (3\varphi_g)^{2/3} \quad (2.3)$$

где n – плотность пузырьков или количество пузырьков в объеме φ_g , 1/м³.

Компоненты формулы (2.2) исследовались многими авторами. Например, в работе [150] 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 то же время известно, что коэффициент массопередачи k зависит от таких параметров, как: температура T , скорость всплытия пузырьков газа u_g , их диаметр, вязкость и плотность среды. Так согласно Дирендонку коэффициент k равен [147]:

$$k = 0,423 \sqrt{\frac{\mu_l g}{\rho_l}} Sc^{-0,5} \quad (2.4)$$

где μ_l – динамическая вязкость жидкости, Па·с; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ_l – плотность воды, кг/м³; Sc – число Шмидта, $Sc = \mu_l / (\rho_l \cdot D_{O_3})$; D_{O_3} – коэффициент диффузии озона в воде.

Также известна модель Хигби, согласно которой [142]:

$$k = 1,13 \sqrt{\frac{D_{O_3}}{\frac{d_b}{u_g}}} \quad (2.5)$$

где d_b – диаметр газовых пузырьков, т.к. принятый в геометрической модели диаметр отверстия для подачи озоновоздушной смеси в воду равен 3 мм, то принимаем $d_b = 0,003$ м.

В обеих формулах используется коэффициент диффузии D_{O_3} , который также зависит от температуры. Существует несколько моделей,

описывающих эту зависимость. Так согласно Джонсану и Дэвису коэффициент диффузии озона D_{O_3} в воде [146]:

$$D_{O_3} = 1,1 \cdot 10^{-6} e^{(-1896/T)} \quad (2.6)$$

Другая модель принадлежит Вилки и Чэнгу [146]:

$$D_{O_3} = \frac{7,4 \cdot 10^{-8} \sqrt{2,6 \cdot MT}}{\mu_l \cdot (0,285 \cdot V^{1,048})^{0,6}} \quad (2.7)$$

где V – критический объем озона, равный 89 см³/моль [140].

Сравнение результатов расчета по формулам (2.6) и (2.7) с учетом зависимости динамической вязкости μ_l от температуры воды T показано на рис. 2.3. Диапазон температур от 20 до 50°C взятый в исследовании обусловлен значениями температур анолита получаемыми при работе дискретных и проточных электроактиваторов в работах [16, 48].

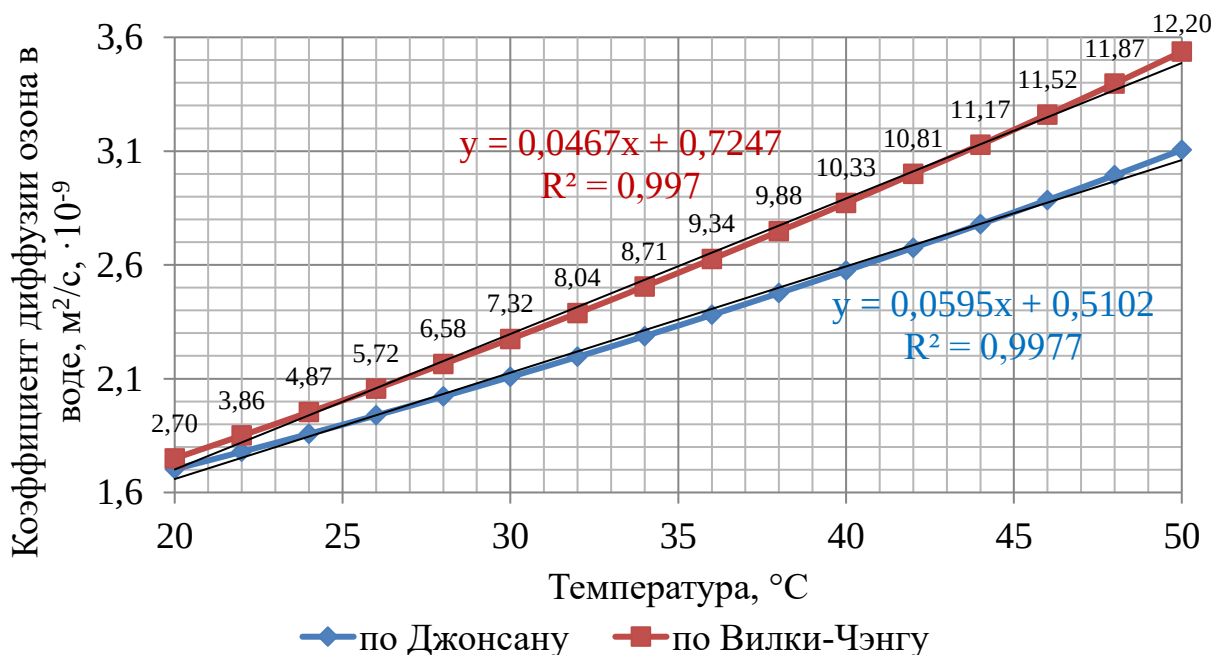


Рисунок 2.3 – Графики изменения коэффициента диффузии озона D_{O_3} в воде при изменении ее температуры, рассчитанные по (2.6) и (2.7)

Как видно в обоих случаях зависимость D_{O_3} от T в диапазоне от 20 до 50°C может быть описана линейно и обе представленные модели очень похожи друг на друга. Разница между полученными данными при 20°C

составляет 2,7 % и постепенно увеличивается, так что при 50°C составляет не более 12,2 % (рис. 2.3). Принимая во внимание небольшую разницу между моделями, а также учет вязкости воды, которая также зависит от температуры T , для дальнейшего компьютерного моделирования будем использовать формулу (2.7).

Задаваясь произвольно скоростями всплытия газа в анолите u_g равными 0,1, 0,2 и 0,3 м/с, а также диаметрами пузырей d_b равными 0,003 м и 0,004 м и подставляя (2.7) в (2.4) и (2.5) получим графики, показанные на рис. 2.4.

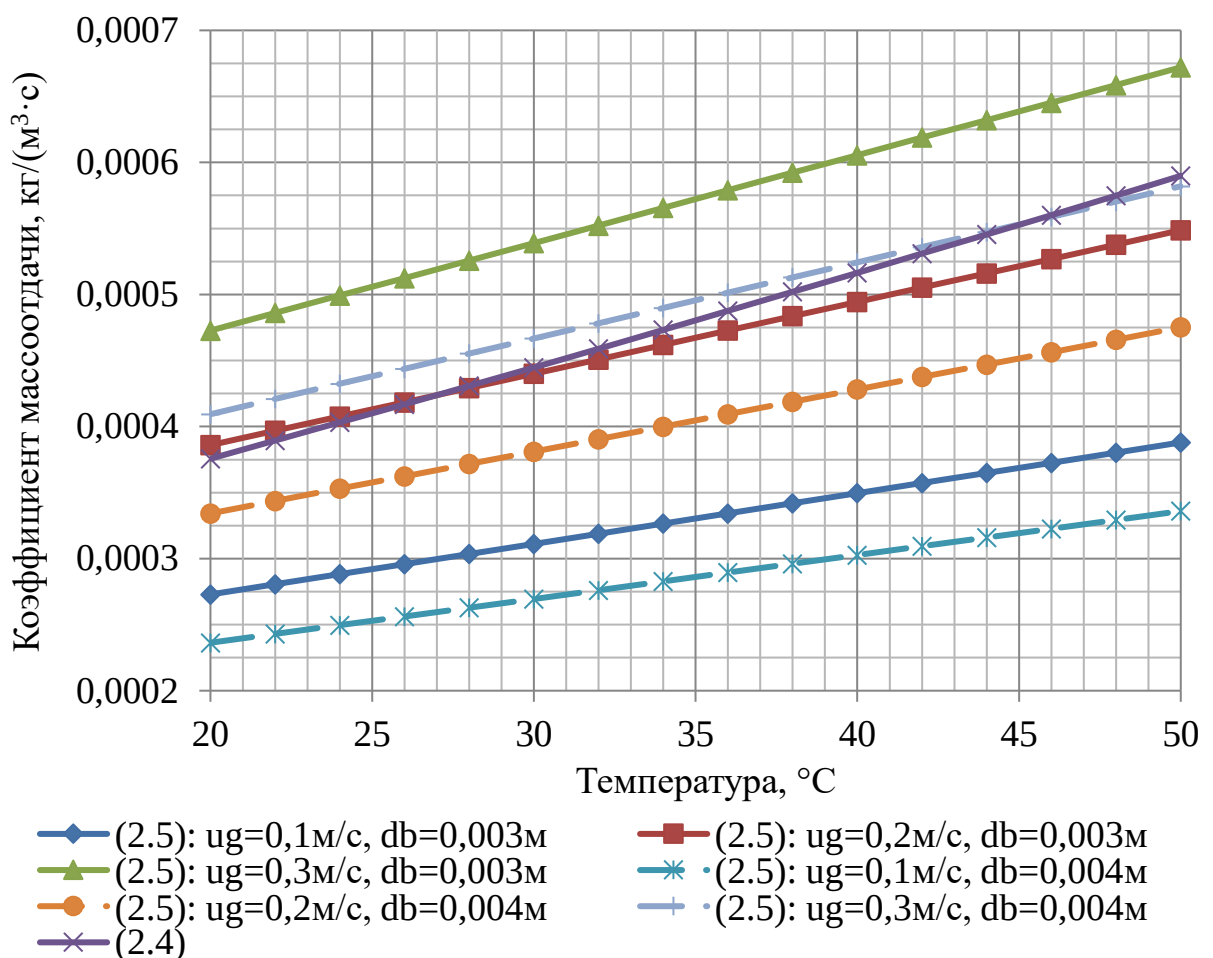


Рисунок 2.4 – Графики изменения коэффициента массопередачи k от температуры T полученные по (2.4) и (2.5)

Представленные зависимости k от T согласно (2.4) и (2.5) в рассматриваемом температурном диапазоне имеют линейный вид. При этом значения коэффициента массопередачи k рассчитанные по (2.5) сильно

зависят от скорости газа u_g и диаметра его пузырьков d_b . Так увеличение диаметра d_b на 1 мм приводит к уменьшению коэффициента массопередачи k на $\approx 15\%$, а увеличение скорости u_g к увеличению k на $\approx 37\%$. В то время, как k рассчитанный по (2.4) изменяется в небольшом диапазоне от 0,00038 кг/(м³·с) до 0,00059 кг/(м³·с). Ввиду такой существенной зависимости k от u_g и d_b при дальнейшем компьютерном моделировании процесса барботирования потока анолита озоном будем использовать формулу (2.5).

Также существенно зависящим от температуры параметром в формуле (2.2) является равновесная концентрация озона в воде c_p . В соответствии с таблицей, приведенной в [35] ее зависимость от температуры T может быть представлена в виде графика, показанного на рис. 2.5.

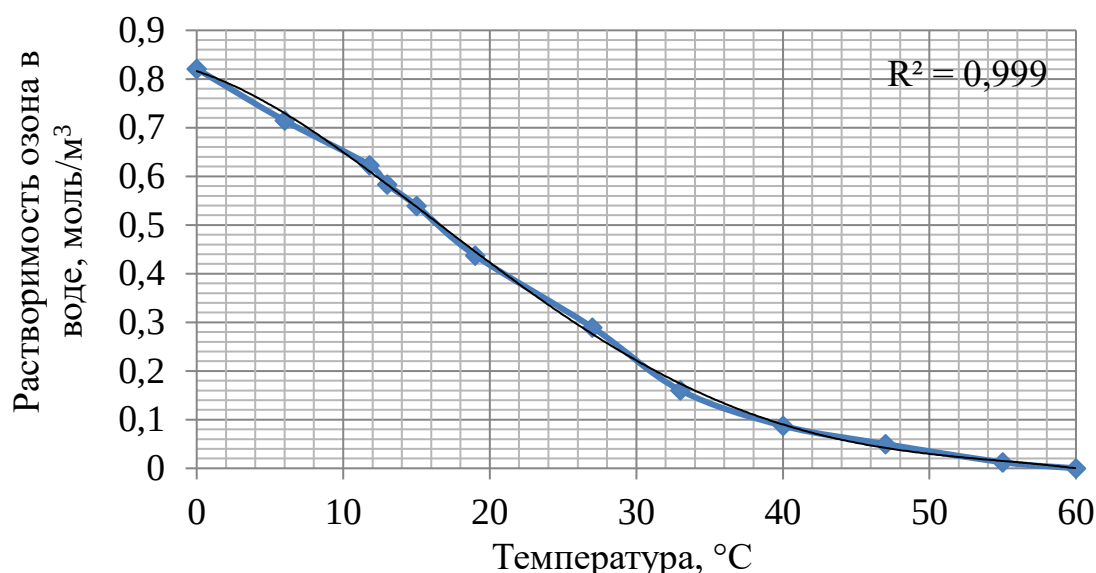


Рисунок 2.5 – График равновесной концентрации озона в воде c_p от температуры T согласно [35]

При 20°C равновесная концентрация озона в воде c_p составляет 0,42 моль/м³, но уже при увеличении температуры до 30°C она уменьшается в 2 раза – 0,22 моль/м³, а при увеличении температуры до 50°C уменьшается в более чем 10 раз и становится равной менее 0,04 моль/м³. Такое резкое снижение растворимости озона обусловлено интенсивным его распадом при температурах свыше 50°C [61].

Для зависимости на рис. 2.5 было получено регрессионное уравнение в виде полинома 4-ой степени с целью дальнейшего его использования при компьютерном моделировании:

$$c_p = -1,76 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 + 248,5 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 - 9240,6 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 97170,4 \cdot 10^{-7} \cdot T + 0,82 \quad (2.8)$$

Полученное регрессионное уравнение качественное, что отражает коэффициент детерминации R^2 равный 0,99.

Рассмотренные выше зависимости компонентов формулы (2.2) от температуры T показывают важность рассмотрения тепловых полей в установке, которые связаны с протеканием электрического тока через нее. Поэтому далее необходимо разработать модель теплофизических процессов в рассматриваемом проточном электроактиваторе водных растворов. Помимо этого, согласно формуле (2.5) необходимо знать скорость газа u_g . Для этого необходимо получить модель барботирования потока анолита озоном, которая бы учитывала: течение потока газа и воды в анодной камере; массоперенос растворенного озона в анолите, зависящий от диффузии газа D_{O_3} , которая как была показано выше в свою очередь зависит от температуры T .

2.2 Разработка математических моделей основных процессов в проточном электроактиваторе

Течение потока пузырей газа и воды в анодной камере можно описать с помощью уравнений Навье-Стокса. Для того чтобы использовать данные уравнения следует определиться с видом течения в установке. Для этого определим число Рейнольдса Re . Для увеличения массообмена между газом и жидкостью необходимо чтобы пузыри газа как можно больше времени находились в жидкости. Поэтому зададимся небольшим расходом воды через

установку Q : от 1,5 л/мин до 2,5 л/мин. И так как мы моделируем только поток воды и газа через анодную камеру, то расход Q_A через нее составит в два раза меньше от 0,75 л/мин, до 1,25 л/мин. Т.к. диаметр входного сечения известен и равен 19 мм, то скорость воды на входе в анодную камеру при максимальном расходе – 1,25 л/мин будет равна:

$$u_l = \frac{4Q_A}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 2,1 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot 0,019^2} = 0,074 \text{ м/с} \quad (2.9)$$

где u_l – скорость воды, м/с; Q_A – расход воды через анодную камеру, м³/с; d – диаметр трубопровода, мм.

При расходе 0,75 л/мин, скорость воды составит 0,044 м/с. Число Рейнольдса Re при расходе 1,25 л/мин и при температуре воды 20°C составит:

$$Re = \frac{u_l \cdot d}{\nu} = \frac{0,074 \cdot 0,019}{1,004 \cdot 10^{-6}} = 1400 \quad (2.10)$$

где ν – кинематическая вязкость воды при 20°C.

При расходе 0,75 л/мин число Re будет ещё меньше и составит 833. Таким образом, поток в установке ламинарный, что позволяет описать поля течения жидкости и газа следующими уравнениями движения (2.11) и неразрывности (2.12) соответственно [25]:

$$\varphi_l \rho_l \frac{\partial u_l}{\partial t} + \varphi_l \rho_l (u_l \cdot \nabla) u_l = \nabla \left(-p + \varphi_l \mu_l \left(\nabla u_l + (\nabla u_l)^T - \frac{2}{3} (\nabla u_l) \vec{I} \right) \right) + \varphi_l \rho_l g \quad (2.11)$$

где p – давление, Па; φ_l – объемная доля, занимаемая жидкостью, м³/м³; $\vec{I}$ – единичный вектор.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varphi_l \rho_l + \varphi_g \rho_g) + \nabla (\varphi_l \rho_l u_l + \varphi_g \rho_g u_g) = 0 \quad (2.12)$$

В рассматриваемом процессе принимаем допущение, что пузырьки газа могут расширяться или сжиматься, но не могут полностью исчезать, сливаться или разделяться, т.е. плотность пузырьков газа всегда сохраняется неизменной:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot n(u_l + u_{slip}) = 0 \quad (2.13)$$

где u_{slip} – скорость, направленная по касательной к стенкам геометрической модели, м/с.

Для определения u_{slip} можно воспользоваться так называемым балансом между силой вязкого сопротивления f_D и градиентом давления в установке p :

$$f_D = \varphi_l \nabla p \quad (2.14)$$

Сила вязкого сопротивления может быть определена из уравнения:

$$f_D = -C_d \frac{3}{4} \frac{\rho_l}{d_b} |u_{slip}| u_{slip} \quad (2.15)$$

где C_d – коэффициент вязкого сопротивления, безразмерная величина.

Существует множество моделей позволяющих найти C_d . Как правило, все они применимы для конкретных значений d_b . Например, модели Шварца-Тёрнера для воздушных пузырей в воде диаметром от 1 до 10 мм, Соколихина-Эйгенбергера-Лапина для пузырей диаметром более 2 мм и др. Наилучшую сходимость при дальнейшем компьютерном моделировании показала модель Адамара-Рыбчинского:

$$C_d = \frac{16}{\frac{d_b \rho_l |u_{slip}|}{\mu_l}} \quad (2.16)$$

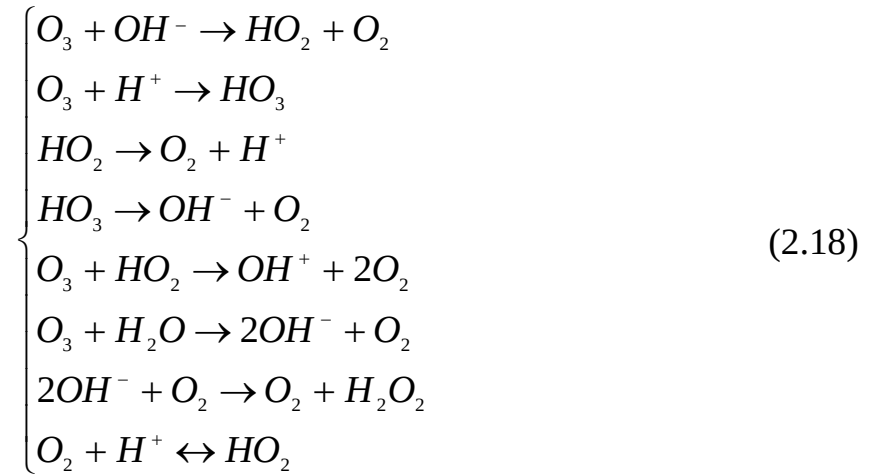
Перенос массы растворенного озона в воде посредством конвекции и диффузии описывается уравнением [25]:

$$\frac{\partial c_{O_3}}{\partial t} + \nabla J_{O_3} + u_l \nabla c_{O_3} = R_{O_3} \quad (2.17)$$

где J_{O_3} – плотность потока озона, вызванного диффузией, определяется уравнением Фика: $J_{O_3} = -D_{O_3} \nabla c_{O_3}$, моль/(м²·с); R_{O_3} – скорость реакции с участием озона равная отношению m_{gl} к его молярной массе M , моль/(м³·с).

Помимо процесса растворения озона в воде, также происходит его взаимодействие с другими веществами, находящимися в ней. Так согласно

[29, 31] в воде озон взаимодействует с ионами водорода, гидроксида, молекулами воды, молекулами гидропероксила и озонида водорода:



Образованная перекись водорода также вступает в реакцию с озоном, но концентрация ее невелика и поэтому данную реакцию не учитывали при дальнейшем компьютерном моделировании процесса барботажа. Перенос в воде образованных по реакциям (2.18) веществ также можно описать уравнением (2.17).

Уравнения (2.1), (2.11)-(2.17) описывают процесс барботирования потока анолита озоном и в общем виде его математическая модель выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \varphi_g \rho_g}{\partial t} + \nabla(\varphi_g \rho_g u_g) = -m_{gl}; \quad m_{gl} = f(k, T, u_g, c_{O_3}, \mu_l, a); \\ \varphi_l \rho_l \frac{\partial u_l}{\partial t} + \varphi_l \rho_l (u_l \cdot \nabla) u_l = \nabla \left(-p + \varphi_l \mu_l \left(\nabla u_l + (\nabla u_l)^T - \frac{2}{3} (\nabla u_l) \vec{I} \right) \right) + \varphi_l \rho_l g; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\varphi_l \rho_l + \varphi_g \rho_g) + \nabla(\varphi_l \rho_l u_l + \varphi_g \rho_g u_g) = 0; \\ \frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot n(u_l + u_{slip}) = 0; \quad u_{slip} = f(\rho_l, d_b, \mu_l, \varphi_l, p); \\ \frac{\partial c_{O_3}}{\partial t} + \nabla J_{O_3} + u_l \nabla c_{O_3} = R_{O_3}. \end{array} \right. \quad (2.19)$$

Протекание электрического тока через электроактиватор и связанный с этим процесс нагрева установки можно описать с помощью закона Ома и закона Джоуля-Ленца. Тогда уравнение, описывающее тепловые процессы в анодной, катодной камерах, а также в диафрагме будет иметь вид [144]:

$$\rho_l C_l \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q_l + \rho_l C_l u_l \nabla T = \Theta \quad (2.20)$$

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

Тепловой поток q_l определяется с помощью закона Фика:

$$q_l = -k_l \nabla T \quad (2.21)$$

где k_l – коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·К).

Плотность тока $i_l = -\sigma_l \nabla \phi_l$, где σ_l – проводимость среды, С/м. Поскольку проводимости анолита σ_A и католита σ_K и диафрагмы σ_d в результате электролиза по отношению к исходной воде могут значительно изменяться, а сам процесс связан со сложными электрохимическими явлениями в электролите и на границах «электрод – электролит» (протекание электродных реакций, процессы диффузии веществ из объема электролита к электроду, химические реакции в электролите и т.п.) то воспользуемся экспериментальными данными для их определения. Так в [16] было проведено исследование изменения проводимости анолита и католита в зависимости от pH получаемого раствора. Полученные данные представлены на рис. 2.6.

Проводимость исходной воды σ_0 была равна 700 мкСм/см, а ее pH = 8,2. Из рис. 2.6 видно, что в диапазоне pH от 3 до 10,5 проводимость изменяется почти линейно (куда входит рассматриваемый нами диапазон из п.1.4), но коэффициент детерминации R^2 при этом составит менее 0,9 и для дальнейшего моделирования нами определено, что представленная зависимость может быть качественно описана с помощью полинома 6 степени (коэффициент детерминации при этом составил $R^2 = 0,97$):

$$\sigma_A = 0,57pH_A^6 - 23pH_A^5 + 376,6pH_A^4 - 3211,3pH_A^3 + 15039pH_A^2 - 36584pH_A + 36306 \quad (2.22)$$

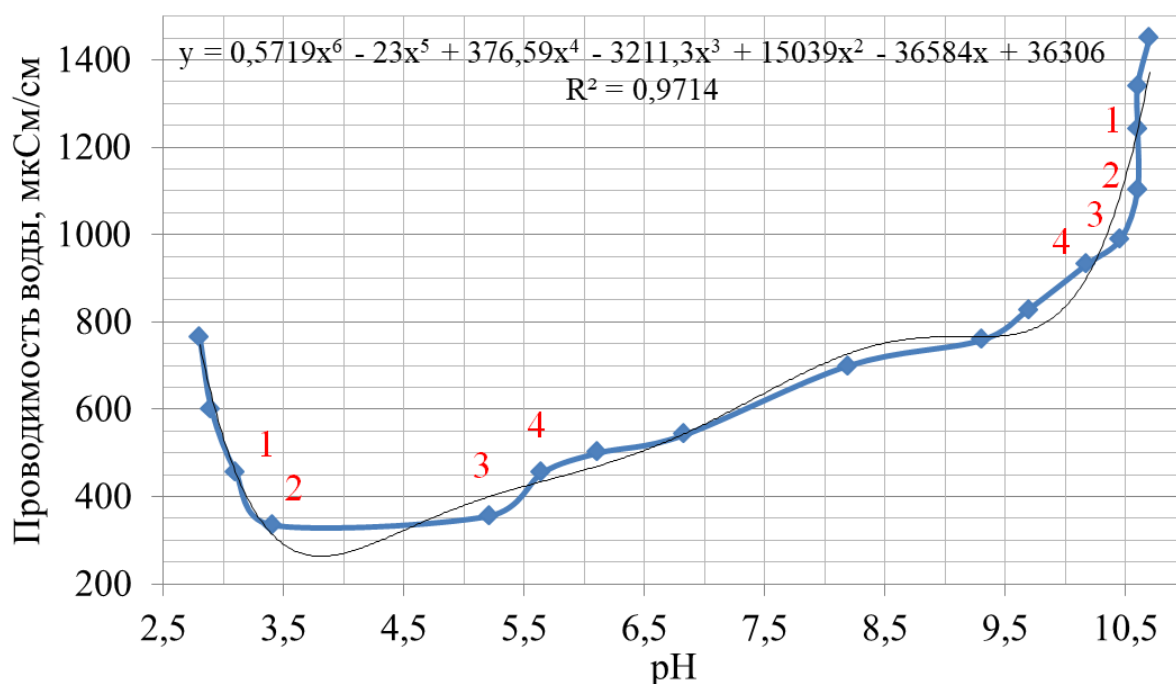


Рисунок 2.6 – График изменения проводимости от pH [16]

Так как начальная проводимость воды в зависимости от ее источника может значительно изменяться, нами были проведены поисковые эксперименты по исследованию изменения проводимости анолита σ_A во время электролиза при различных значениях проводимости исходной воды σ_0 . Результаты показаны в приложении 1. Из них видно, что характер изменения проводимости анолита остается постоянным и зависит лишь от начального значения σ_0 . Что позволяет использовать уравнение (2.22) для последующего моделирования процессов в рассматриваемой установке с поправкой на σ_0 :

$$\sigma_A = 0,57pH_A^6 - 23pH_A^5 + 376,6pH_A^4 - 3211,3pH_A^3 + 15039pH_A^2 - 36584pH_A + 36306 + (\sigma_0 - 700) \quad (2.23)$$

В уравнении (2.23) остается неизвестным pH. Его значение для анолита можно определить исходя из выражения указанного в [48]:

$$pH_A = (pH_{нач} - 7,5) + (6,32 + 0,025Q_A - 0,1735I + 0,0023Q_AI - 0,0017Q_A^2 - 0,0068I^2) \quad (2.24)$$

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

Так как (2.24) позволяет определить лишь pH анолита, то для определения проводимости католита σ_K сделаем следующее. В интересующем нас диапазоне pH анолита от 3 до 6 (см. п. 1.4) обозначим все точки цифрами от 1 до 4 и найдем соответствующие им точки в области католита (см. рис. 2.6). Далее найдем среднее этих точек и примем это значение за σ_K . Оно будет равно 1066,5 мкСм/см. Для определения проводимости диафрагмы примем допущение о том, что σ_D равна среднему между проводимостями католита и анолита и тогда для определения σ_A , σ_K и σ_D будем использовать систему:

$$\begin{cases} pH_A = (pH_{нач} - 7,5) + (6,32 + 0,025Q_A - 0,1735I + 0,0023Q_AI - 0,0017Q_A^2 - 0,0068I^2); \\ \sigma_A = 0,57pH_A^6 - 23pH_A^5 + 376,6pH_A^4 - 3211pH_A^3 + 15039pH_A^2 - \\ - 36584pH_A + 36306 + (\sigma_0 - 700); \\ \sigma_K = 1066,5 + (\sigma_0 - 700); \\ \sigma_D = (\sigma_A + \sigma_K) / 2. \end{cases} \quad (2.25)$$

Уравнения (2.20), (2.21) и система (2.25) описывают теплофизические процессы в проточном электроактиваторе и в общем виде их математическая модель выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \rho_l C_l \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q_l + \rho_l C_l u_l \nabla T = \sigma_l (\nabla \phi)^2; q_l = -k_l \nabla T; \\ \sigma_A = f(pH_{нач}, Q_A, I, \sigma_0); \\ \sigma_K = 1066,5 + (\sigma_0 - 700); \\ \sigma_D = (\sigma_A + \sigma_K) / 2. \end{cases} \quad (2.26)$$

Предположим, что $pH_{нач} = 8,3$ и $\sigma_0 = 600$ мкСм/см (что соответствует водопроводной воде в Кубанском ГАУ, проводимость которой по нашим исследованиям может колебаться от 400 до 700 мкСм/см) и проведем расчеты в соответствии с (2.25). Их результаты показаны в табл. 2.1. Как видно из нее

проводимость анолита во время работы электролизера может изменяться более чем в 7 раз, что в свою очередь влияет на его нагрев и соответственно на растворимость озона в нем.

Таблица 2.1 – Результаты расчетов проводимостей анолита, католита, диафрагмы и pH анолита при разных значениях тока I и расхода воды Q при $pH_{нач} = 8,3$ и $\sigma_0 = 600$ мкСм/см

$I, A \rightarrow$	-	5	10	15	20	5	10	15	20
$Q, \text{л/мин} \downarrow$	$\sigma_k, \text{мкСм/см}$	$\sigma_d, \text{мкСм/см}$				$\sigma_A, \text{мкСм/см} / pH_A$			
1,5	966,5	743,3	687,3	637,9	565,0	$\frac{520,2}{7,4}$	$\frac{408,0}{6,5}$	$\frac{309,3}{5,3}$	$\frac{163,5}{3,8}$
2		763,7	714,4	661,6	599,4	$\frac{560,8}{7,7}$	$\frac{462,4}{7}$	$\frac{356,8}{5,9}$	$\frac{232,3}{4,6}$
2,5		777,6	741,0	685,8	637,0	$\frac{588,8}{7,9}$	$\frac{515,5}{7,3}$	$\frac{405,2}{6,5}$	$\frac{307,4}{5,3}$

Диапазон токов от 5 А до 20 А почти полностью перекрывает рассматриваемый уровень pH от 6-ти до 3-х. Но немаловажным является и мощность, затрачиваемая на изменение pH исходной воды, т.к. проточная установка в отличие от непроточной потребляет гораздо больше энергии. Для ее определения необходимо найти падение напряжения между анодом и катодом. Помимо этого, исходя из табл. 2.1 расход воды через электролизер Q также оказывает воздействие на процесс электролиза и влияет на температуру раствора. Так, при $Q = 2,5$ л/мин pH анолита составляет 5,3, но при этом возможно, что количество растворенного при этом озона в анолите будет больше. Таким образом, основными действующими параметрами раствора, влияющими на болезнетворные микроорганизмы, по нашему мнению, являются pH анолита и концентрация растворенного в нем озона. Оба они зависят от мощности $P = \phi_l \cdot I$, затрачиваемой на получение дезинфицирующего раствора, его температуры T и расхода воды Q через

установку. Поэтому с помощью компьютерного моделирования необходимо определить:

- насколько сильно нагревается анолит при выбранном диапазоне токов и на сколько существенно его нагрев влияет на растворимость озона в нем;
- определить падение напряжения между анодом и катодом для определения мощности затрачиваемой на изменение величины pH;
- определить рациональный расход воды через электролизер и его влияние на растворимость озона в анолите.

2.3 Получение обобщенной математической модели и ее реализация в ПО Comsol Multiphysics

Для компьютерного моделирования описанных в предыдущей главе процессов в ПО Comsol Multiphysics были задействованы следующие физические интерфейсы. Для моделирования поля скоростей жидкой и газовой фаз был использован интерфейс – Bubbly Flow, в котором проводилось решение уравнений (2.1), (2.2), (2.11) – (2.16). Процесс массопереноса – изменения концентрации растворенного озона в воде C_{O_3} рассчитывался с помощью интерфейса Transport of Diluted Species, который был связан с предыдущим интерфейсом через уравнения (2.2) и (2.17). Помимо расчета массопереноса озона по уравнению (2.17), в интерфейсе Transport of Diluted Species рассчитывался массоперенос и других веществ, взаимодействующих с растворенным озоном. Для этого в интерфейсе Chemistry рассчитывались скорости реакций (2.18). Для определения тепловых полей использовался интерфейс Heat Transfer in Fluids в котором решались уравнения (2.20) и (2.21). Т.к. мультифизическая связь между интерфейсами Bubbly Flow и Heat Transfer in Fluids с целью моделирования конвективного потока воды в (2.20) в программе Comsol Multiphysics невозможна, то для этого использовалась связка интерфейсов Laminar Flow и

Heat Transfer in Fluids. При этом настройки интерфейса Laminar Flow были идентичны настройкам интерфейса Bubble Flow. Для расчета падения напряжения на диафрагме и электролите ϕ_l с целью получения Θ в (2.20) был задействован интерфейс Primary Current Distribution и его мультифизическая связка с интерфейсом Heat Transfer in Fluids – Electrochemical Heating. Для этого задавались значениями токов: 5, 10, 15 и 20 А.

В используемых интерфейсах были заданы следующие граничные условия. В интерфейсе Bubbly Flow для создания потока воды на входной поверхности, показанной на рис. 2.7 синим цветом было задано условие Inlet, в котором задавалась скорость поступающей в установку воды v_{l_in} по известным значениям расхода и диаметра входного сечения, согласно формуле (2.9). Расчеты проводили при следующих значениях расхода через установку Q: 1,5, 2 и 2,5 л/мин; или Q_A : 0,75, 1 и 1,25 л/мин через анодную камеру соответственно. Для улучшения сходимости эти числа умножались на функцию step1 показанную на рис. 2.8 и таким образом расход в начальный момент времени не был равен принятым значениям, а повышался до них постепенно в течение 0,1 с.

На выходной границе было задано условие Outlet (рис. 2.7 показано синим цветом):

$$n \left(-pI + \phi_l \mu_l \left(\nabla u_l + (\nabla u_l)^T - \frac{2}{3} (\nabla u_l) I \right) \right) = -p_{out} n \quad (2.27)$$

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

На границе, через которую в модели подается озон (рис 2.7 показано синим цветом) было задано граничное условие Wall для случая, когда скорость u_{l_wall} , направленная по нормали n к стенке равна нулю:

$$n \cdot u_{l_wall} = 0 \quad (2.28)$$

Также на этой границе было задано значение плотности потока массы озона N_{wall} , который определялся как произведение производительности озонатора A_{O_3} и площади сечения S , через которую озон подается в воду:

$$-n \cdot N_{wall} = A_{O_3} \cdot S \quad (2.29)$$

Производительность A_{O_3} принимаем равной до 2 г/ч, что соответствует производительности современных бытовых и наиболее доступных озонаторов.

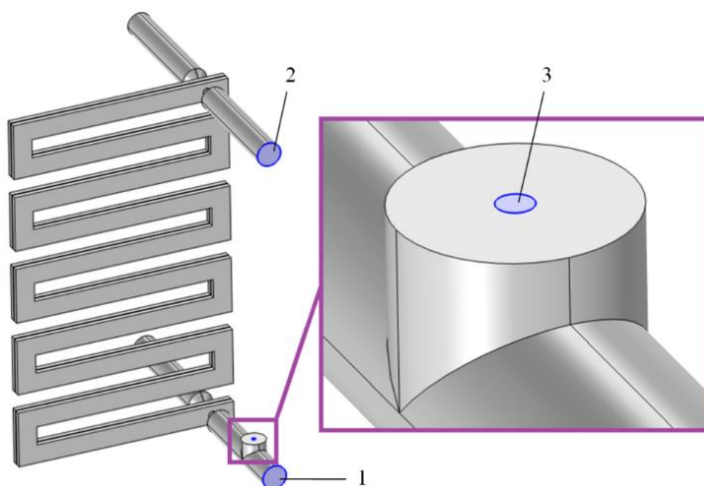


Рисунок 2.7 – Изображение поверхностей, на которых были заданы граничные условия: 1 – Inlet, 2 – Outlet, 3 – Wall

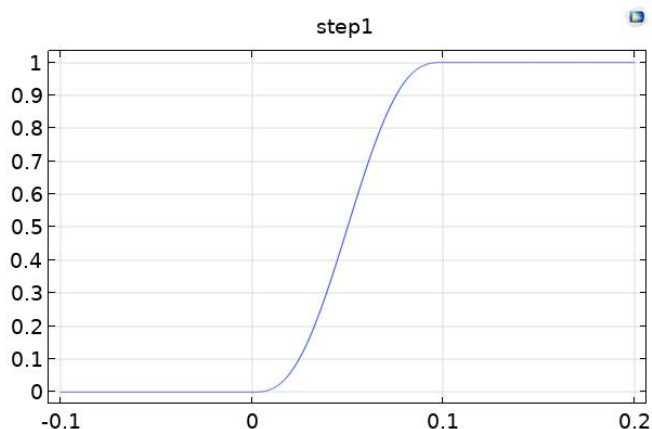


Рисунок 2.8 – График функции step1 позволяющий добиться постепенного повышения расхода и массопередачи газа в воду в начале расчета

На остальных поверхностях рассматриваемой модели в интерфейсе Bubbly Flow, которые показаны на рисунке 2.7 серым цветом было задано условие равенства скорости воды u_i нулю.

Коэффициент массопередачи k вычисляемый по формуле (2.5) в модели также был умножен на функцию step1 для улучшения сходимости. На поверхности, соответствующей условию Outlet, а также на всех остальных поверхностях модели, показанных серым цветом на рис. 2.7 было задано условие равенства нулю диффузионного потока J_{O_3} из уравнения (2.17):

$$n \cdot J_{O_3} = 0 \quad (2.30)$$

Начальное значение температуры воды в установке было равным 20°C , $pH_{нач} = 8,3$ и $\sigma_0 = 600$ мкСм/см.

Рассматриваемая задача решалась в постановке, зависящей от времени и в обобщенном виде, компьютерная математическая модель, включающая модели, разработанные в п. 2.2, а также заданных граничных условий выглядела следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_l \rho_l \frac{\partial u_l}{\partial t} + \varphi_l \rho_l (u_l \cdot \nabla) u_l = \\ = \nabla \left(-p + \varphi_l \mu_l \left(\nabla u_l + (\nabla u_l)^T - \frac{2}{3} (\nabla u_l) I \right) \right) + \varphi_l \rho_l g; \text{ ур - ие движения} \\ \frac{\partial}{\partial t} (\varphi_l \rho_l + \varphi_g \rho_g) + \nabla (\varphi_l \rho_l u_l + \varphi_g \rho_g u_g) = 0; \text{ ур - ие неразрывности} \\ \frac{\partial \varphi_g \rho_g}{\partial t} + \nabla (\varphi_g \rho_g u_g) = -m_{gl}; \text{ ур - ие массопередачи газа в воду} \\ m_{gl} = f(k, T, u_g, c_{O_3}, \mu_l, a); \text{ зави - ть массоперед ачи от вязкости, скорости воды и др.} \\ \frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot n(u_l + u_{slip}) = 0; \text{ условие сохр - ия кол - ва пузырьков в объеме} \\ \frac{\partial c_{O_3}}{\partial t} + \nabla J_{O_3} + u_l \nabla c_{O_3} = R_{O_3}; \text{ ур - ие переноса озона в анолите} \\ v_{l_in} = \frac{4Q}{2\pi d^2}; \text{ ГУ на входе воды в установку} \\ n \left(-pI + \varphi_l \mu_l \left(\nabla u_l + (\nabla u_l)^T - \frac{2}{3} (\nabla u_l) I \right) \right) = -p_{out} n; \text{ ГУ на выходе анолита из установки} \\ n \cdot u_{l_wall} = 0; n \cdot J_{O_3} = 0; -n \cdot N_{wall} = A_{O_3} \cdot S; \text{ ГУ на входе озона в установку и на ее стенках} \\ \rho_l C_l \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q_l + \rho_l C_l u_l \nabla T = \sigma_l (\nabla \phi)^2; \text{ закон сохранения энергии} \\ pH_A = (pH_{нач} - 7,5) + (6,32 + 0,025Q_A - 0,1735I + 0,0023Q_A I - 0,00017Q_A^2 - 0,0068I^2); \text{ определени е pH анолита} \\ \sigma_A = 0,57188pH_A^6 - 22,99985pH_A^5 + 376,58764pH_A^4 - 3211,32514pH_A^3 + \\ + 15039,25025pH_A^2 - 36584,1109815039,25025pH_A + 36306,47146 + \\ + (\sigma_0 - 700); \text{ определени е проводимости анолита} \\ \sigma_K = 1066,5 + (\sigma_0 - 700); \text{ определени е проводимости католита} \\ \sigma_d = (\sigma_A + \sigma_K) / 2. \text{ определени е проводимости диафрагмы} \end{array} \right. \quad (2.31)$$

В результате реализации модели (2.31) при разных значениях подаваемого на электроактиватор тока (5, 10, 15 и 20 А) и разном расходе воды Q (1,5, 2 и 2,5 л/мин) через него были получены изображения полей концентрации растворенного в воде озона c_{O_3} , температур T и падения напряжения ϕ_l на основных элементах электроактиватора – катодной и анодной камерах, а также диафрагме. Так на рис. 2.9 представлены изображения концентраций растворенного озона внутри установки при разных значениях тока и при расходе $Q = 1,5$ л/мин (через анодную камеру $Q_A = 0,75$ л/мин).

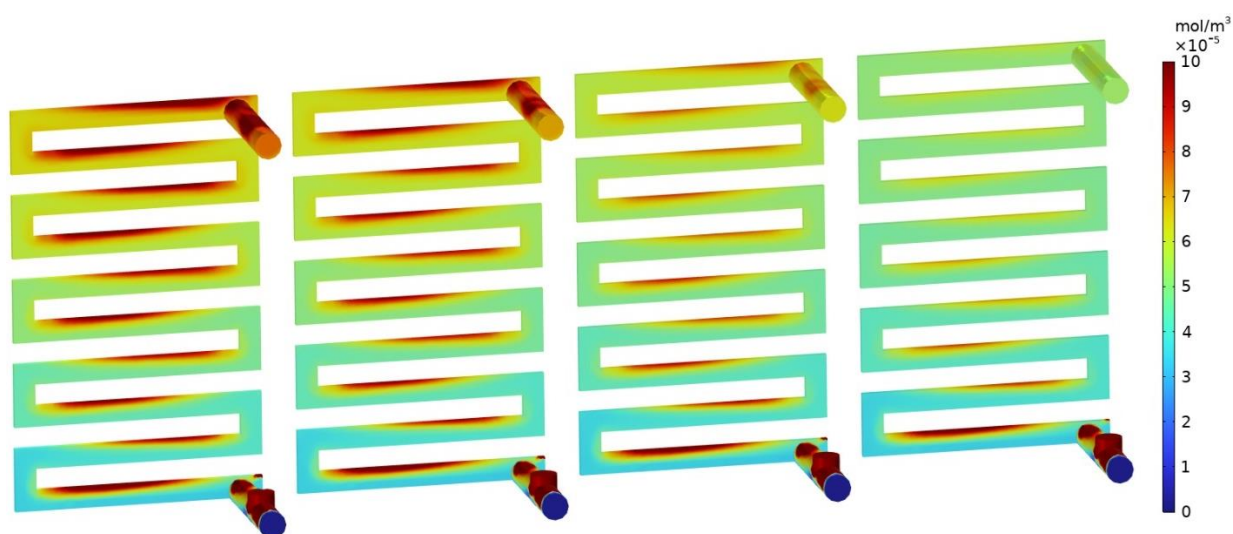


Рисунок 2.9 – Изображение полей концентраций озона c_{O_3} , растворенного в анодной камере при расходе $Q = 1,5$ л/мин через 2 минуты барботажа при токах (слева на право): 5 А, 10 А, 15 А и 20 А.

Как и было предсказано в п.2.1 температура раствора, зависящая от подаваемого на электроактиватор тока, сильно дестабилизирует концентрацию озона в анолите. Наиболее наглядно это видно на рис. 2.10, на котором изображены графики зависимостей концентраций c_{O_3} на выходе из установки от времени при различных значениях тока при $Q = 1,5$ л/мин. Наибольшие концентрации озона наблюдаются при малых токах и соответственно при малых температурах. Так при токах 5, 10, 15 и 20 А на выходе из установки концентрации озона c_{O_3} равны соответственно: $77,8 \cdot 10^{-6}$,

$71,8 \cdot 10^{-6}$, $63 \cdot 10^{-6}$ и $53 \cdot 10^{-6}$ моль/м³. Или же согласно формуле перевода из моль/м³ в мг/л из [97]: $c_{O_3}[\text{мг/л}] = c_{O_3}[\text{моль/м}^3] \cdot M$, концентрации озона c_{O_3} будут равны соответственно: 0,00373, 0,00345, 0,00302, 0,00254 мг/л. Таким образом, при заданной производительности по анолиту – 0,75 л/мин, увеличение тока с 5 А до 20 А приводит к уменьшению растворенного в нем озона в 1,5 раза.

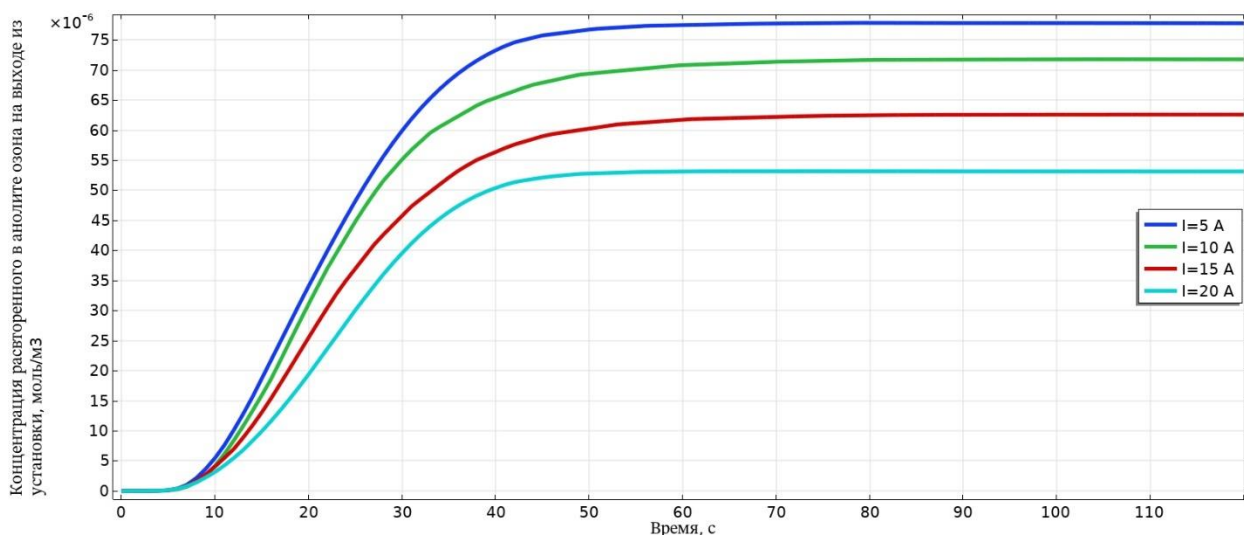


Рисунок 2.10 – Графики изменения во времени концентраций растворенного в анолите озона на выходе из установки при разных значениях тока и при производительности по анолиту $Q = 1,5$ л/мин

Время выхода на установившийся режим по концентрации озона в анолите при расходе $Q = 1,5$ л/мин в независимости от силы тока составляет 50-60 секунд (рис. 2.10).

Как видно силы тока 5 А и 10 А незначительно влияют на концентрацию озона в анолите. Разница между ними составляет не более 7,5 %. Это обусловлено небольшой разницей в температурных полях при этих токах (рис. 2.11 и 2.12). Так на выходе из анодной камеры в установившемся температурном режиме, который достигается при данных токах к 20 секунде, при 5 А температура анолита составляет 21,7°C, а при 10 А – 26,7°C. В то время как при 15 А она составляет 35°C, а при 20 А – 46,6°C. Таким образом, увеличение тока с 5 А до 20 А увеличивает температуру анолита на выходе

из установки более чем в 2 раза, что и приводит к снижению концентрации растворенного в нем озона.

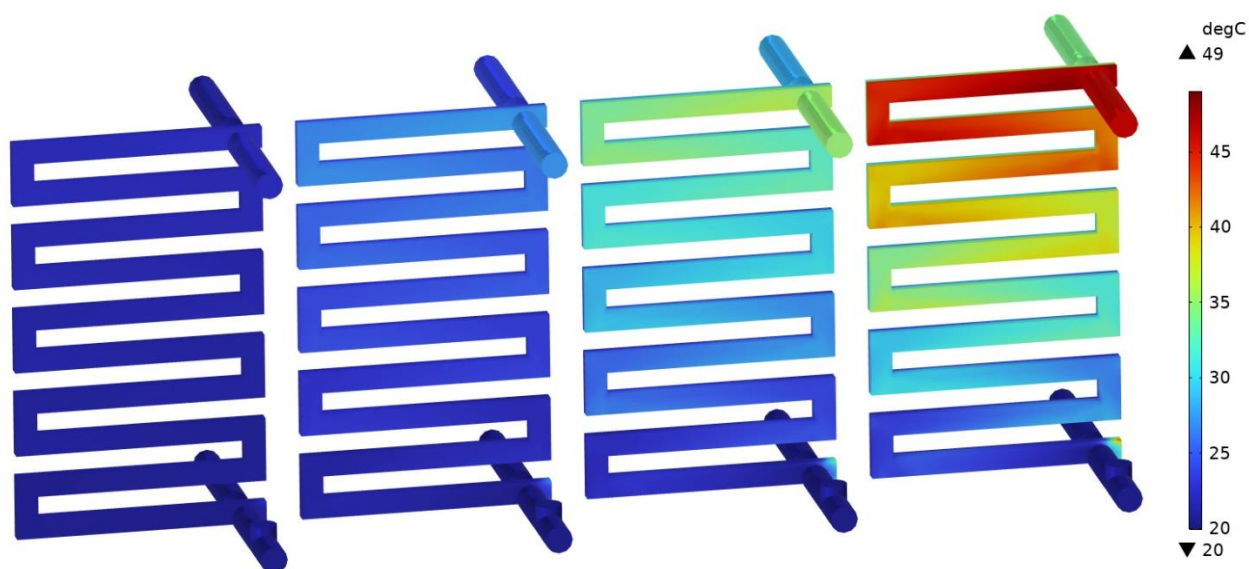


Рисунок 2.11 – Изображения температурных полей в установке при $Q = 1,5$ л/мин через 2 минуты барботажа при токах (слева на право): 5 А, 10 А, 15 А и 20 А

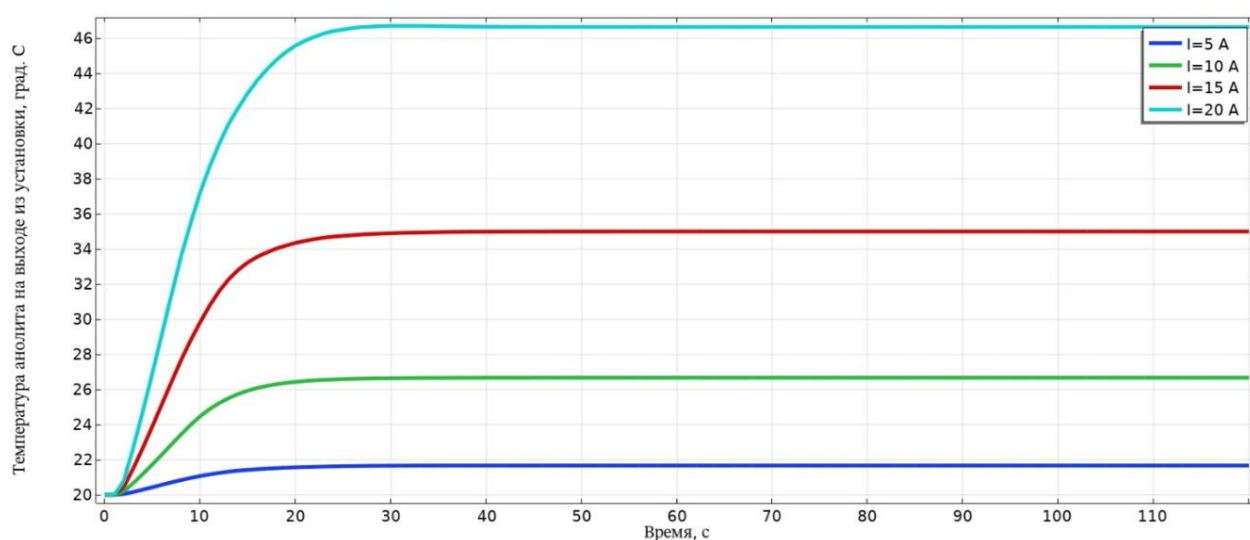


Рисунок 2.12 – Графики изменения во времени температуры анолита на выходе из установки при разных значениях тока и при производительности по анолиту $Q = 1,5$ л/мин

Увеличение расхода воды через установку Q до 2 л/мин ($Q_A = 1$ л/мин) приводит к падению концентрации озона в анолите (рис. 2.13 а). Это

обосновывается уменьшением времени пребывания пузырей озона в анодной камере электролизера. Так при токе 5 А и $Q = 2$ л/мин концентрация озона в анолите на выходе из установки составляет $65,2 \cdot 10^{-6}$ моль/м³ или 0,00313 мг/л, что на 16% меньше, чем при том же токе и $Q = 1,5$ л/мин. При увеличении Q до 2,5 л/мин ($Q_A = 1,25$ л/мин) концентрация озона при токе 5 А составит $51,3 \cdot 10^{-6}$ моль/м³ или 0,00246 мг/л, что уже на 44% меньше, чем при том же токе и $Q = 1,5$ л/мин (рис. 2.13 б). Подобная ситуация наблюдается и при других значениях подаваемого тока (табл. 2.2). Выход на установившийся режим по озону при $Q = 2$ л/мин и $Q = 2,5$ л/мин такой же, как и при $Q = 1,5$ л/мин – 50-60 секунд.

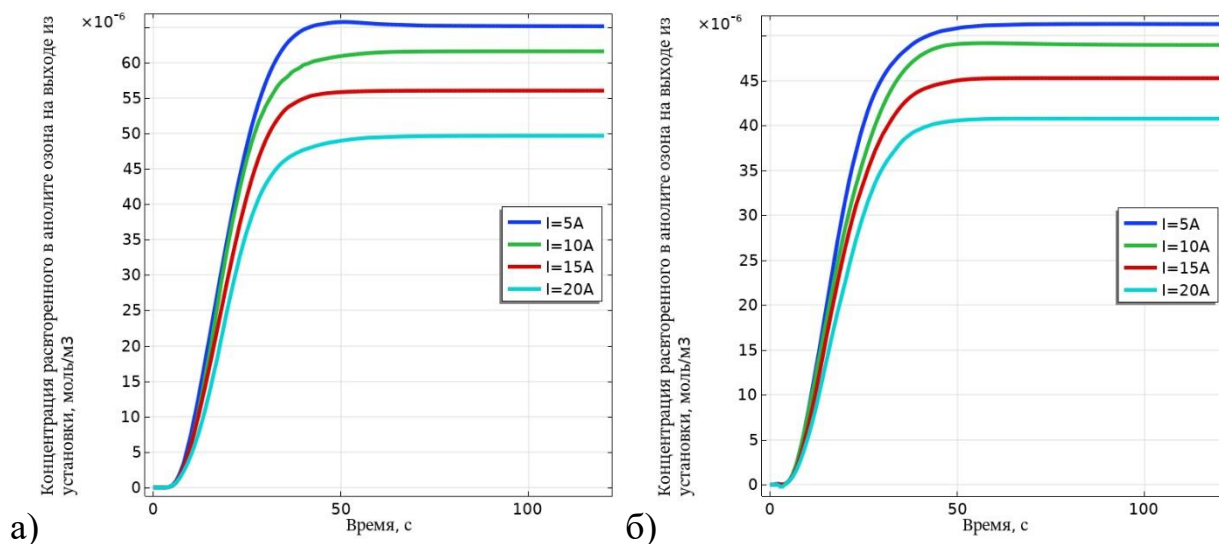


Рисунок 2.13 – Графики изменения во времени концентраций растворенного в анолите озона на выходе из установки при разных значениях тока и при производительностях: а) $Q = 2$ л/мин; б) $Q = 2,5$ л/мин

Увеличение Q способствует снижению температуры анолита (рис. 2.14 и табл. 2.2). Это должно увеличивать растворимость озона в нем, но как видно из табл. 2.2. этого не происходит вследствие малого времени нахождения пузырей газа в объеме анодной камеры. К тому же увеличение Q также приводит к увеличению pH анолита (табл. 2.1). Снижение Q приводит с одной стороны к увеличению растворенного в анолите озона при малых токах – 5 А и 10 А, а с другой стороны еще больше ускоряет его распад при больших токах из-за роста температуры (рис. 2.15. и табл. 2.2). Так при $Q = 1$

л/мин и токе 15 А концентрация озона в анолите равна $62 \cdot 10^{-6}$ моль/м³, что соответствует концентрации, получаемой при этом же токе, но при $Q = 1,5$ л/мин – $63 \cdot 10^{-6}$ моль/м³. То же самое наблюдается и в случае подачи 20 А на электролизер, при $Q = 1$ л/мин концентрация растворенного в воде озона равна $48 \cdot 10^{-6}$ моль/м³, что соответствует концентрации, получаемой уже при $Q = 2$ л/мин – $49,6 \cdot 10^{-6}$ моль/м³ (табл. 2.2). При снижении Q до 1 л/мин также увеличивается время выхода на установившийся режим по озону на 20-30 с, по сравнению с большими значениями Q и составляет 80 с (рис. 2.15 а).

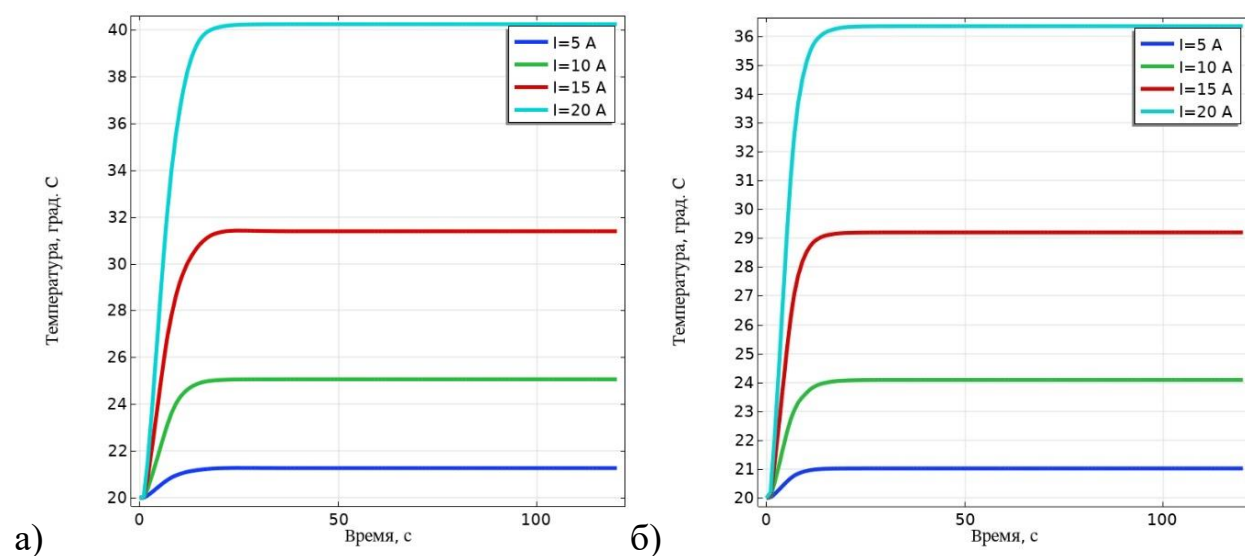


Рисунок 2.14 – Графики изменения во времени температуры анолита на выходе из установки при разных значениях тока и при производительностях: а) $Q = 2$ л/мин; б) $Q = 2,5$ л/мин

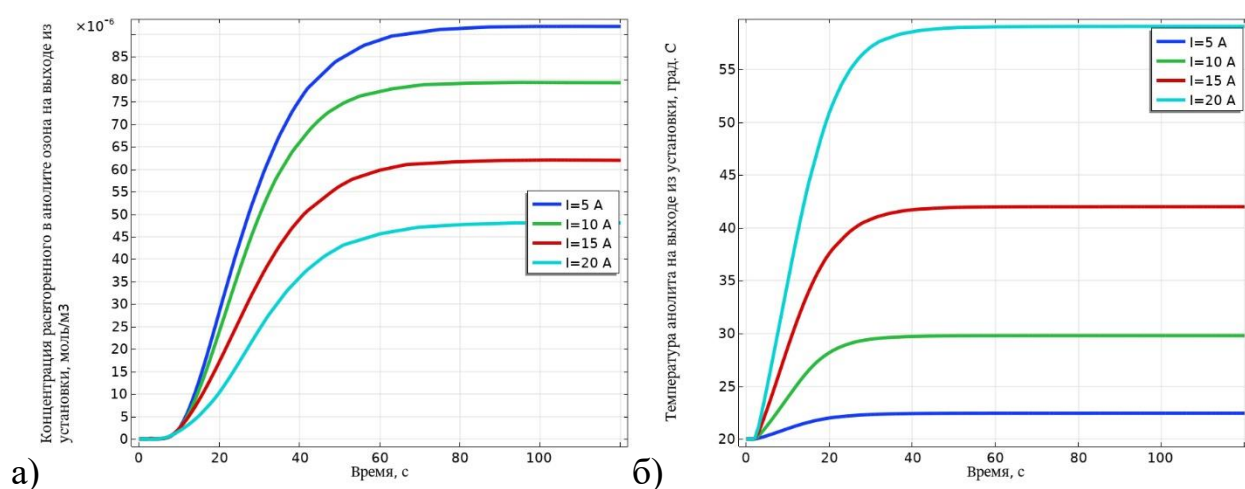


Рисунок 2.15 – Графики изменения во времени концентраций растворенного в анолите озона (а) и температуры (б) на выходе из установки при разных значениях тока и при производительности $Q = 1$ л/мин

Таблица 2.2 – Зависимости влияния тока и расхода Q на концентрацию растворенного в анолите озона c_{O_3} и температуру T раствора на выходе из установки

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

Таким образом, наиболее рациональным расходом воды через установку при котором достигаются высокие значения концентраций озона при токах от 15 А является $Q = 1,5$ л/мин. Но помимо концентрации озона в растворе на болезнетворные микроорганизмы будет оказывать влияние рН анолита и соответственно концентрации хлорсодержащих веществ в нем, как это было показано в п. 1.3. Оценку этого влияния можно провести только экспериментально. Это позволит оценить необходимость использования малых токов.

Также в результате компьютерного моделирования были получены значения напряжений, которые необходимо подать на электролизер, чтобы получить значения рН, которые указаны в табл. 2.1. Полученные зависимости представлены в приложении 2, а также на рис. 2.16.

Из графиков на рис. П2.1-П2.3 и табл. П2.1-П2.3 видно, что в независимости от тока, падение напряжения на анодной камере больше, чем на диафрагме или на катодной камере. Это обусловлено низким значением проводимости анолита σ_A и коррелируется с результатами, представленными в [16].

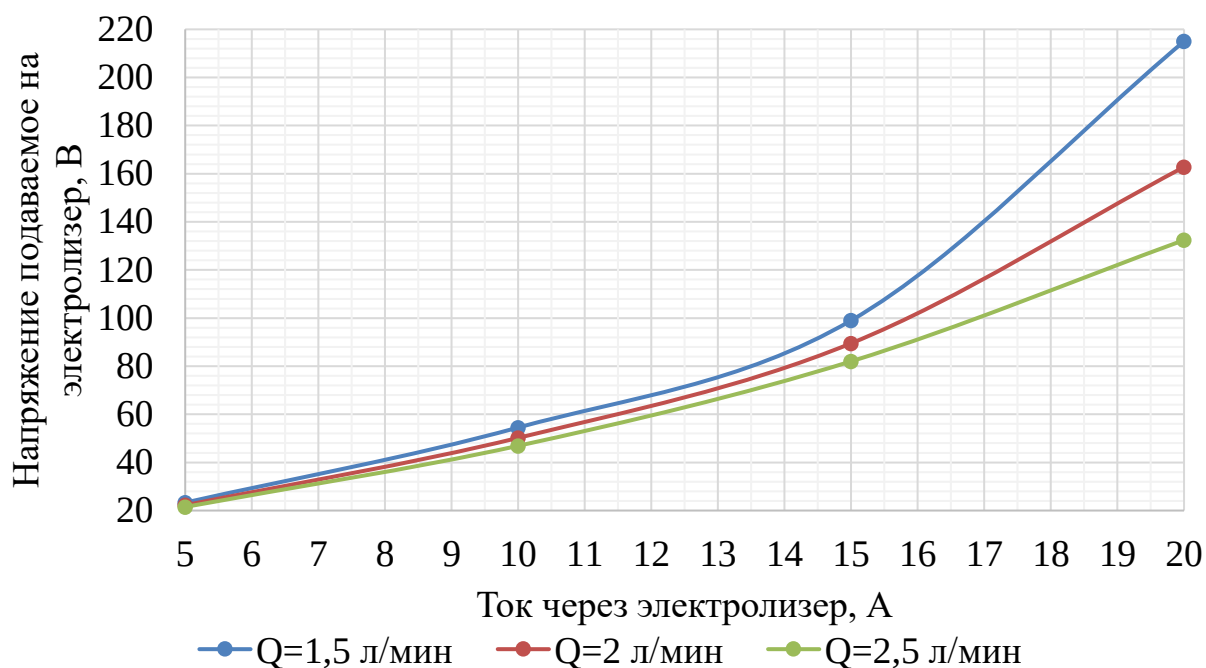


Рисунок 2.16 – ВАХ электролизера при разных значениях расхода воды Q через него

Из рисунка 2.16 или данных, представленных в приложении 2, можно определить мощность установки для их соотношения с рассчитанными ранее уровнями рН (табл. 2.3).

Таблица 2.3 – Мощность установки и рН получаемых растворов при различных значениях тока I и расхода воды Q

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

Из табл. 2.3 видно, что для получения одного и того же рН при $Q = 2,5$ л/мин требуется в 2 раза больше мощности, чем при $Q = 1,5$ л/мин. Так, например, мощность установки для получения рН = 5,3 при $Q = 1,5$ л/мин

равна 1485 Вт, а при $Q = 2,5$ л/мин равна 2648 Вт. То же справедливо и для $pH = 6,5$ (см. табл. 2.3). Таким образом, расход $Q = 1,5$ л/мин является не только рациональным с позиции получения наибольших концентраций растворенного озона в анолите, но и с позиции затрат электрической энергии на пасеке.

Диапазон токов от 15 А до 20 А можно рекомендовать, как наиболее рациональный, т.к. при нем получаются растворы анолита с pH от 5,3 до 3,8, которые согласно рис. 1.7 и 1.8 соответствуют наибольшей концентрации хлорсодержащих веществ в данном растворе.

Для увеличения же концентрации растворенного в анолите озона следует обосновать и реализовать способ насыщения его потока.

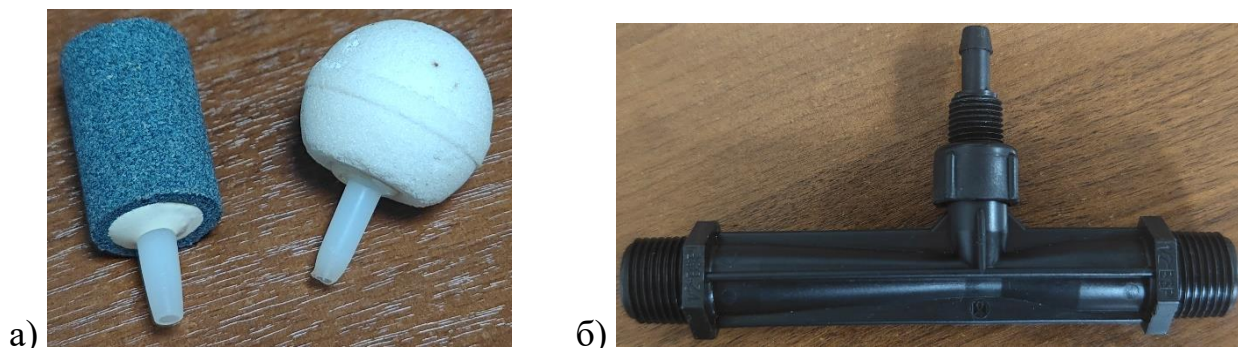
2.4 Способ насыщения анолита озоном в потоке

Для увеличения концентрации растворенного в воде озона возможны следующие варианты:

- 1) использование специальных насадок из мелкопористого материала (рис. 2.17, а) для увеличения количества пузырьков газа n и уменьшения их диаметра d_b в объеме воды, что приводит к увеличению площади поверхности, раздела фаз на единицу объема a в формуле (2.3) и как следствие к увеличению растворимости озона в анолите;
- 2) использование трубки Вентури или так называемое эжектирование (рис. 2.17, б), которое не требует контактной емкости и позволяет осуществлять барботацию в потоке.

Использование первого варианта приведет к увеличению массогабаритных показателей электроактиватора, т.к. потребуются установка дополнительной емкости с размещенной на дне мелкопористой насадкой. К тому же это снизит производительность установки, т.к. придется получать

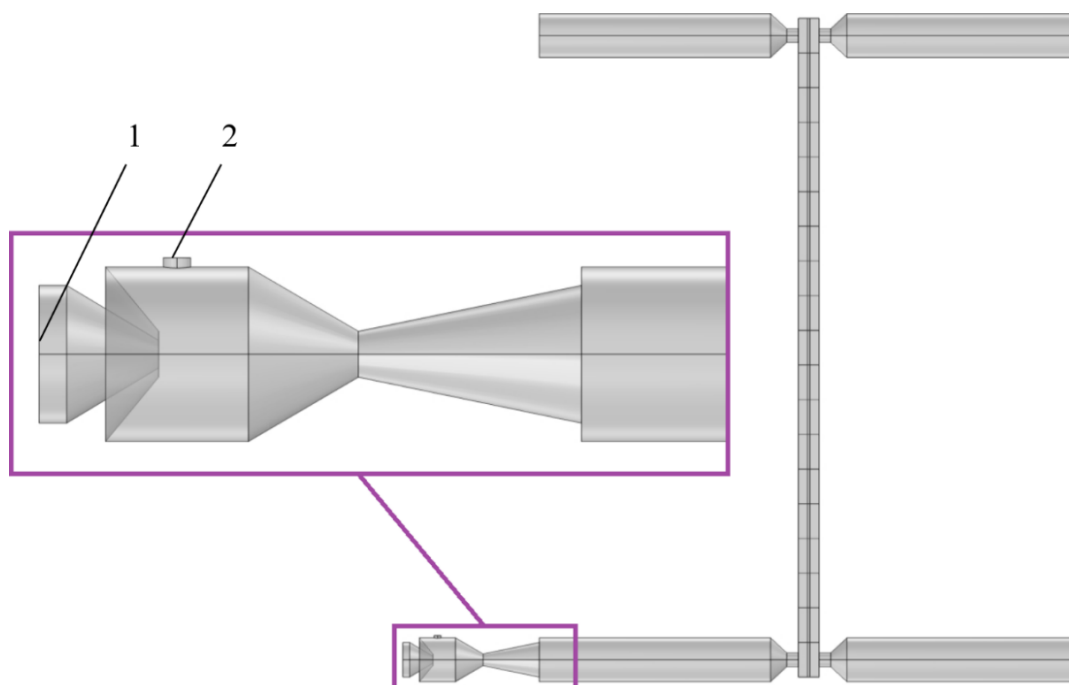
вначале анолит и затем его барботировать, точно так, как и в работе [16]. По нашему мнению, гораздо эффективнее второй способ, т.к. он позволяет проводить смешивание газа с водой непосредственно в потоке воды и не увеличивает массогабаритные показатели установки.



а – использование специальных пористых насадок, б – трубка Вентури

Рисунок 2.17 – Фотографии устройств позволяющих увеличить концентрацию озона в потоке анолита

Геометрическая модель, представленная на рис. 2.1 и 2.2 была изменена. Вместо тройника установлена трубка Вентури (рис. 2.18).



1 – отверстие для подачи исходной воды, 2 – отверстие для подачи озоновоздушной смеси

Рисунок 2.18 – Изображение измененной геометрической модели электроактиватора

Результаты моделирования изменения концентрации озона показаны на рис. 2.19. Из которых видно, что наибольшее насыщение, как и ранее достигается при $Q = 1,5$ л/мин. На рис. 2.20 представлены графики изменения во времени концентраций, растворенного в потоке анолите озона на выходе из установки с установленной трубкой Вентури при разных значениях тока и при производительности по анолиту $Q = 1,5$ л/мин.

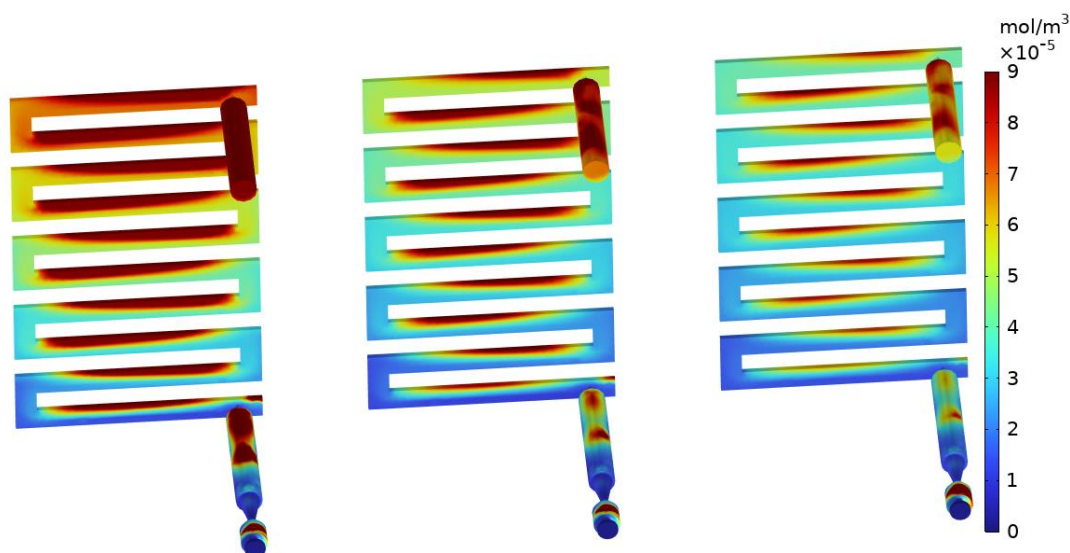


Рисунок 2.19 – Изображение полей концентраций озона CO_3 , растворенного в анодной камере при расходе Q через нее (слева направо): 1,5 л/мин, 2 л/мин и 2,5 л/мин через 2 минуты барботаж при токе 20 А.

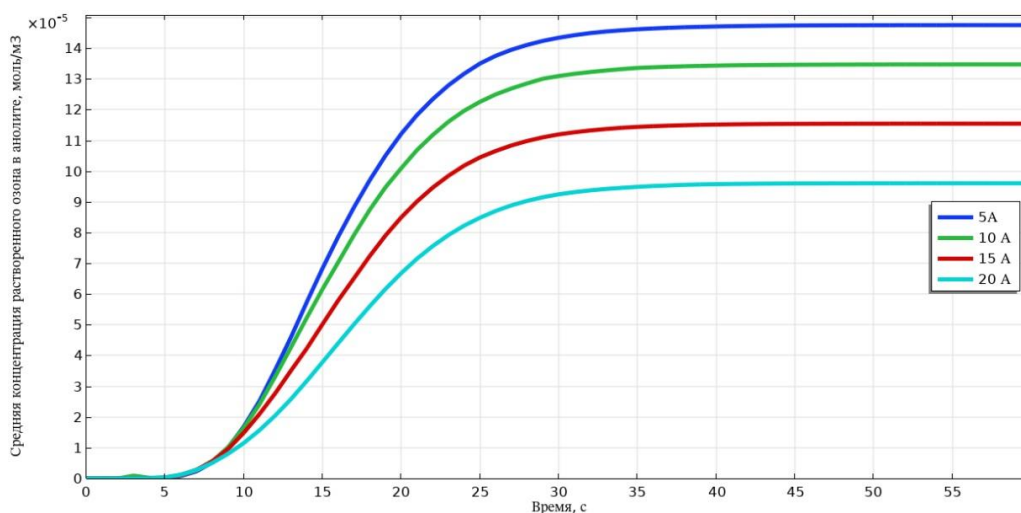


Рисунок 2.20 – Графики изменения во времени концентраций, растворенного озона в потоке анолита на выходе из установки с установленной трубкой Вентури при разных значениях тока и при производительности по анолиту $Q = 1,5$ л/мин

Температура анолита на выходе из модернизированной установки не изменилась, при этом увеличилась концентрация растворенного в нем озона в 2 раза по сравнению с результатами представленными на рис. 2.10 и в табл. 2.2: при токе 5 А с $77,8 \cdot 10^{-6}$ моль/м³ до $148 \cdot 10^{-6}$ моль/м³; при токе 10 А с $71,8 \cdot 10^{-6}$ моль/м³ до $135 \cdot 10^{-6}$ моль/м³; при токе 15 А с $63 \cdot 10^{-6}$ моль/м³ до $116 \cdot 10^{-6}$ моль/м³; при токе 20 А с $53 \cdot 10^{-6}$ моль/м³ до $9,7 \cdot 10^{-6}$ моль/м³. Изменилось и время выхода установки на установившейся режим: с 50-60 секунд до 30-40 секунд.

2.5 Выводы по главе

1. Разработана конструкция и геометрическая модель проточного электроактиватора для профилактической обработки ульев, включающая в себя диафрагменный проточный электролизер воды и подключаемый к входу его анодной камеры смеситель озона с водой. Анодная и катодная камеры выполнены в виде зигзагообразных каналов, толщина которых составляет 4 мм, площадь их продольного сечения – $0,028 \text{ м}^2$, а поперечного – $6 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, объем каждой камеры – $1,131 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$.
2. Разработаны следующие математические модели основных процессов в проточном электроактиваторе: математическая модель барботирования потока анолита озоном на базе уравнений переноса массы вещества, Навье-Стокса, закона Генри, а также найденной эмпирической зависимости равновесной концентрации озона в воде c_p от температуры T ; математическая модель теплофизических процессов в электроактиваторе на базе уравнения теплового баланса, законов Фика, Джоуля-Ленца и Ома, полученных формул для определения проводимостей анолита, католита и диафрагмы.
3. На основании разработанных математических моделей барботирования потока анолита озоном и теплофизических процессов в электроактиваторе

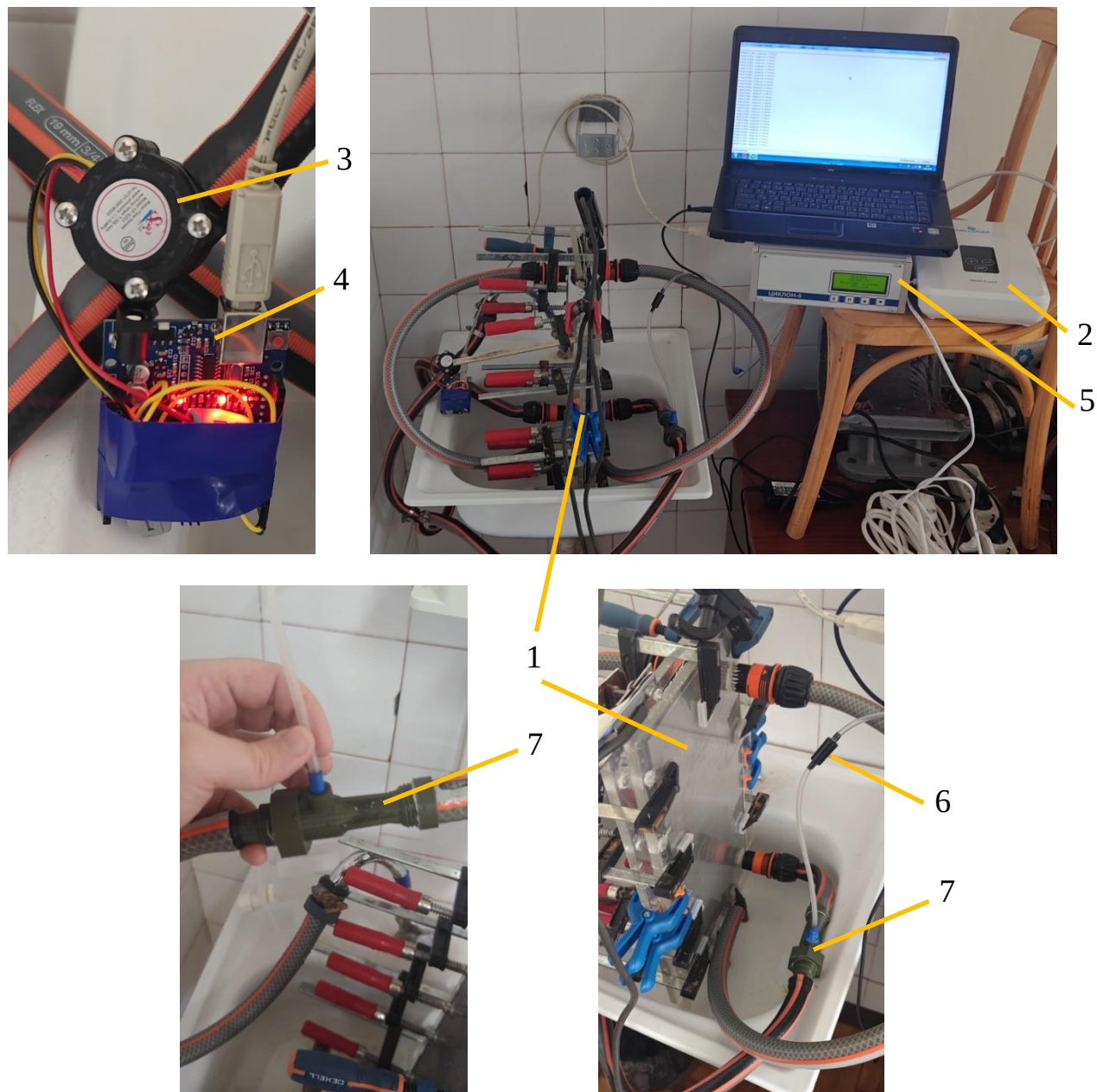
получена их обобщённая компьютерная модель для реализации в ПО Comsol Multiphysics, которая дополнительно включает в себя начальные и граничные условия и учитывающая размеры пузырьков газа, расход воды через установку, плотность потока массы озона и его растворимость от температуры.

4. Результаты реализации компьютерной модели основных процессов в проточном электроактиваторе для профилактических обработок ульев показали, что рациональными параметрами установки являются: расход воды $Q = 1,5$ л/мин, диапазон токов от 15 А до 20 А, уровень pH при этом составит соответственно от 5,3 до 3,8, производительность по озону 2 г/ч. Время выхода на установившийся режим по озону в анолите при этих параметрах составляет 50-60 секунд.
5. Получены ВАХ электроактиватора при электролизе с разными значениями расхода воды Q через него. Определено, что для получения одного и того же pH при расходе $Q = 2,5$ л/мин требуется в 2 раза больше мощности, чем при $Q = 1,5$ л/мин, что позволяет рекомендовать последний также и с точки зрения уменьшения энергозатрат на пасеке.
6. Обоснован способ насыщения потока анолита озоном в разработанной конструкции электроактиватора в виде замены смесителя на трубку Вентури, что позволило при расходе $Q = 1,5$ л/мин увеличить концентрацию озона в анолите на выходе из установки в 2 раза. Время выхода на установившийся режим по растворённому озону в анолите при этом сократилось до 30-40 секунд.

3. МЕТОДИКА, РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ ПРОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОАКТИВАТОРА

3.1 Методика проведения экспериментальных исследований

Для проведения экспериментальных исследований была разработана лабораторная установка, представленная на рис. 3.1.



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

Рисунок 3.1 – Фотографии лабораторной установки

Она включает в себя проточный диафрагменный электролизер воды и подключенную к входу его анодной камеры трубку Вентури для эффективного смешивания озона с водой. Размеры каналов анодной и катодной камер используемого диафрагменного электролизера воды соответствовали размерам в геометрической модели (рис 3.2).

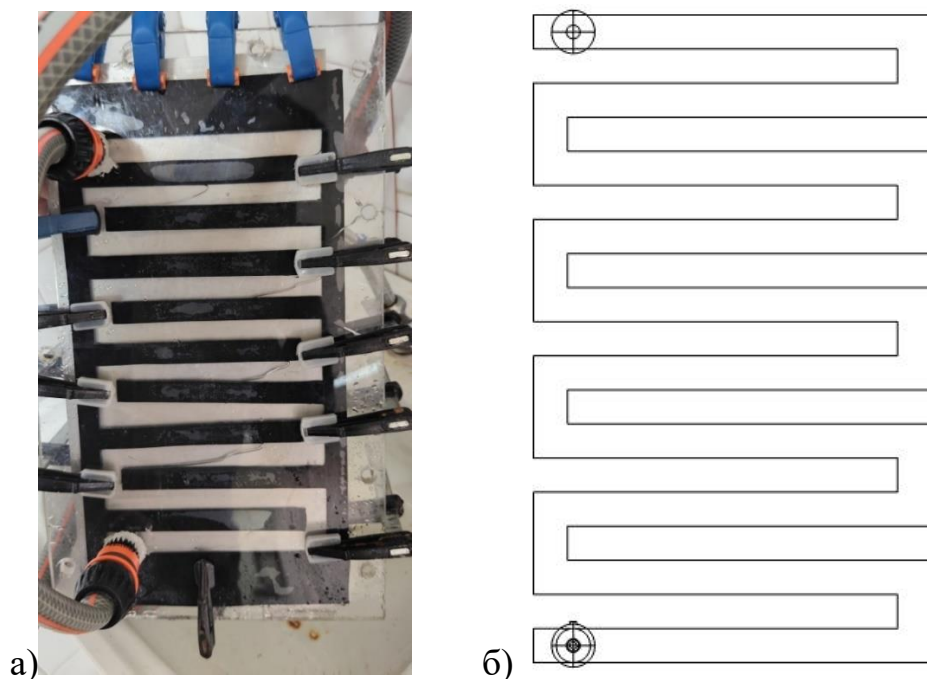


Рисунок 3.2 – Фотография зигзагообразного канала одной из камер электролизера (а) совпадающая с геометрической моделью (б)

Электроды в установке выполнены из стали, но анод для исключения попадания частиц металла в анолит, был покрыт рутением. Электролизер был подключен к источнику водопроводной воды, водородный показатель которой составлял 8,3. В результате экспериментальных исследований определено, что можно получать растворы с рН от 2,7 до 11 без добавления солей в исходную водопроводную воду. Источником питания выступал специальный блок с возможностью регулировки тока до 30 А. Мощность электролизера составила от 500 Вт до 2100 Вт в зависимости от требуемого рН воды. Расход воды через установку регулировался с помощью водопроводного крана. Измерение расхода осуществлялось с помощью расходомера YF-S201. Данные от расходомера подавались, с помощью

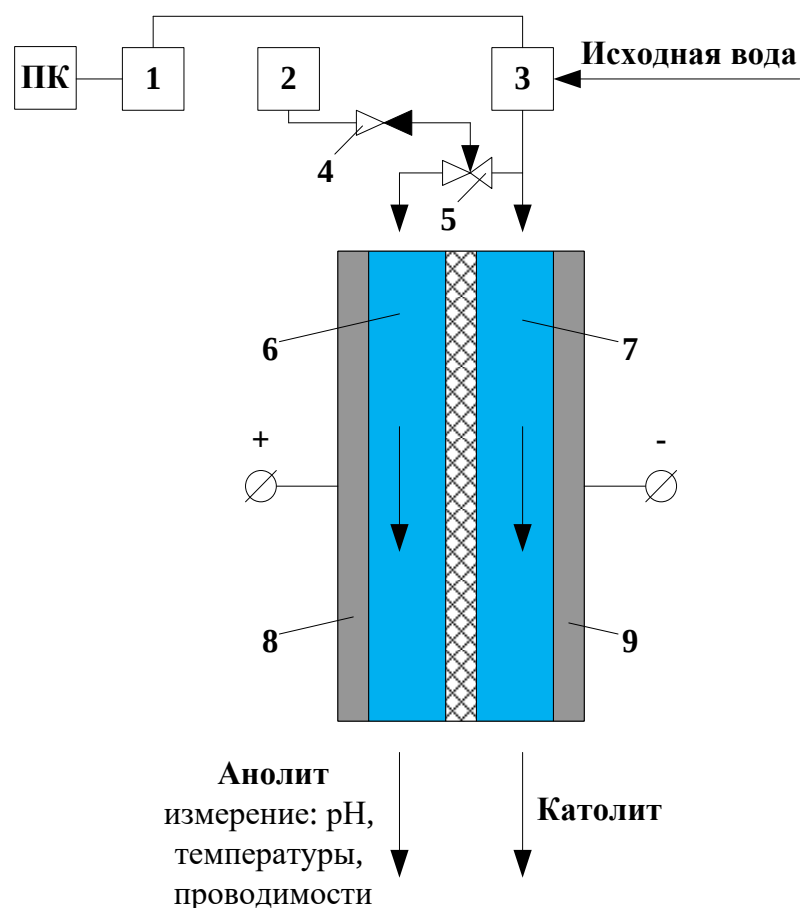
микроконтроллерной платы Arduino, на ноутбук (рис. 3.1). В качестве озонатора использовался бытовой трубчатый озонатор с производительностью 2 г/ч. Концентрация озона на выходе из него в эксперименте была 2000 мг/м³ и регистрировалась с помощью измерителя Циклон-5, который был установлен между озонатором и трубкой Вентури и соединен с ними гибкими трубопроводами. Трубка Вентури соответствующая размерам трубке, представленной в геометрической модели на рис. 2.18, была распечатана на 3D принтере.

Для того чтобы обезопасить измеритель концентрации озона Циклон-5, а также озонатор от действия воды между трубкой Вентури и измерителем был установлен обратный клапан. Измерение озона в воде проводили с помощью измерителя концентрации растворенного в воде озона DOZ30. Измерение pH и температуры получаемых растворов проводили с помощью pH метра BLE-600 (рис. 3.3). В качестве исходной воды использовалась водопроводная вода Кубанского ГАУ параметры которой указаны в [20].



Рисунок 3.3 – Фотографии используемых в эксперименте измерительных приборов для определения концентрации озона в анолите (а), pH и температуры (б)

Схема разработанной лабораторной установки представлена на рис. 3.4



1- микроконтроллерная плата Arduino, 2 – озонатор, 3 – расходомер, 4 – обратный клапан,
5 – трубка Вентури, 6 – анодная камера, 7 – катодная камера, 8 – анод, 9 - катод

Рисунок 3.4 – Схема лабораторной установки для проведения экспериментальных исследований проточного электроактиватора для профилактических обработок ульев

Исследования проводились в несколько этапов. На первом этапе производилась проверка адекватности разработанной математической модели теплофизических процессов в электроактиваторе путем сверки теоретических и экспериментальных данных. Для этого на установку подавались токи: 5, 10, 15, 20, 25 и 30 А. С помощью расходомера контролировался расход воды Q через электроактиватор, который имел такие же фиксированные значения, как и в компьютерной модели: 1,5, 2 и 2,5 л/мин. На выходе из электролизера в этот момент измерялся pH, а также измерялась температура раствора и напряжение между электродами.

Что касается подтверждения адекватности разработанной математической модели барботирования потока анолита озоном, то на рис. 3.5 показан процесс измерения концентрации растворенного озона в полученном анолите при $Q = 1,5$ л/мин.



Рисунок 3.5 – Фотография процесса измерения концентрации растворенного озона в анолите при $Q = 0,75$ л/мин

Полученное значение $c_{O_3} = 0,01$ мг/л соответствует значению, полученному по результатам компьютерного моделирования – $148 \cdot 10^{-6}$ моль/м³ или 0,007 мг/л. Так как используемый измеритель и любой другой имеющийся в продаже не в состоянии показать концентрации ниже, чем 0,01 мг/л, то полностью подтвердить адекватность данной модели возможно только косвенно - через проведение эксперимента по изучению влияния озоносодержащего анолита на плесневые грибы. Эти исследования проводились на втором этапе. Для этого было проведено планирование эксперимента по методике, описанной в [65]. В качестве независимых переменных были выбраны pH раствора – x_1 и расход воды через электроактиватор Q – x_2 . Значения уровней первого фактора x_1 составили: 6, 4 и 2,7. Значения второго фактора x_2 были: 1,5 л/мин, 2 л/мин и 2,5 л/мин, что соответствовало расходу через каждую камеру электролизера соответственно 0,75 л/мин, 1 л/мин и 1,25 л/мин. В качестве зависимой переменной y_1 была принята выживаемость плесневого гриба *Penicillium* sp. Выживаемость

определяли в сравнении с контролем путем подсчета КОЕ. Для выращивания плесневого гриба использовали среду Сабуро, которую готовили по ГОСТ 28085-2013 «Средства лекарственные биологические для ветеринарного применения. Метод бактериологического контроля стерильности» [21]. Среда заливалась в чашки Петри и засеивалась плесневым грибом. Предварительный учет количества выросших колоний проводили на 3 сутки, а окончательный через 5 суток. Повторность эксперимента 3-х кратная. Эксперимент был разбит на две части для оценки эффективности применения получаемых растворов. В первой части проводили исследования влияния на выживаемость тест-объекта только анолита, а во второй анолита барботированного озоном.

На третьем этапе проводились исследования растворов на пасеке Краснодарского края в весенне-летний период.

3.2 Результаты проверки адекватности модели теплофизических процессов в проточном электроактиваторе

На рисунках 3.6-3.8 и таблице 3.1 показано сравнение теоретических и экспериментальных данных изменения температуры анолита на выходе из установки. Начальные значения температуры исходной воды в эксперименте были от 18°C до 19°C, а в компьютерной модели начальная температура была равна 20°C. Поэтому все измеренные в ходе эксперимента температуры получаемых анолитов были скорректированы с учетом этой разницы. Как видно из графиков на рис. 3.6-3.8 и табл. 3.1 отклонение теоретических данных, от данных полученных экспериментально составило не более 6,7 %.

Сравнение теоретической и экспериментальной данных осуществлялось с помощью U-критерия Манна-Уитни ввиду наличия малых выборок согласно методике, представленной в [141]. Результаты расчета представлены в приложении 3. Во всех трех случаях расчетное значение U-

критерия при уровне значимости $p = 0,05$ находилось в зоне незначимости, что говорит о том, что между теоретическими и экспериментальными данными нет никаких статистических различий. Проведенное сравнение теоретических и экспериментальных данных говорит об адекватности полученных с помощью компьютерной модели температурных данных.

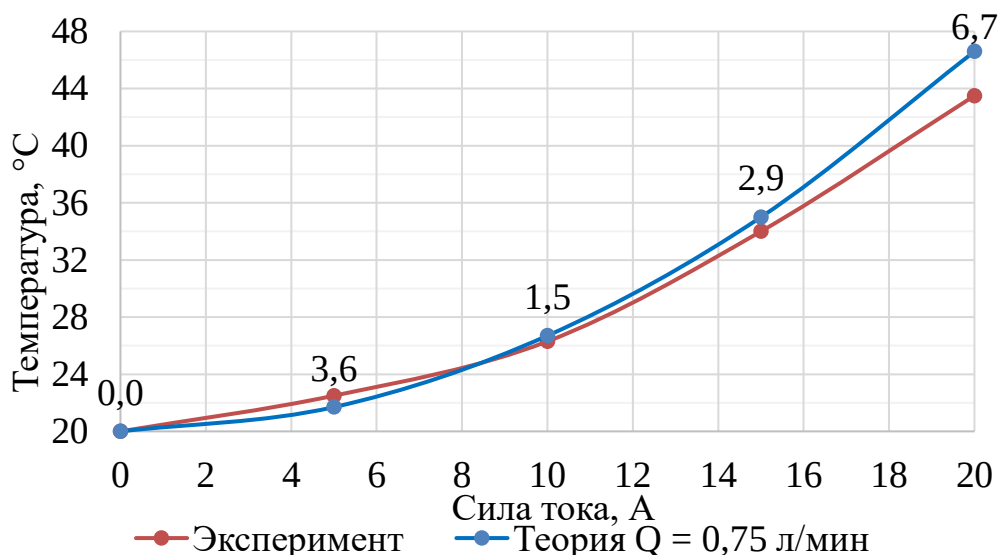


Рисунок 3.6 – Графики сравнения теоретических и экспериментальных данных температуры анолита на выходе из электроактиватора при $Q = 1,5$ л/мин

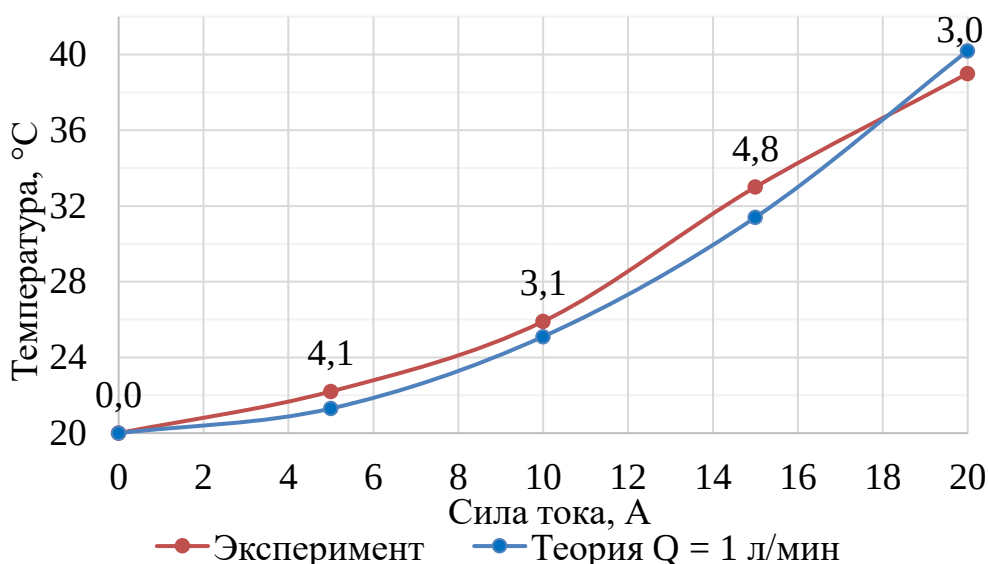


Рисунок 3.7 – Графики сравнения теоретических и экспериментальных данных температуры анолита на выходе из электроактиватора при $Q = 2$ л/мин

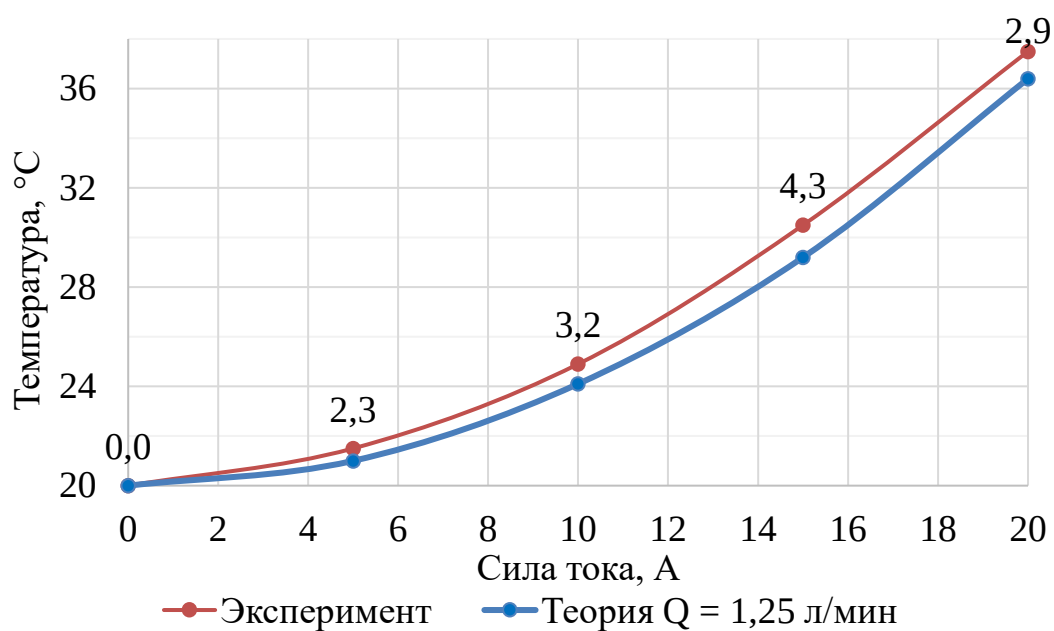


Рисунок 3.8 – Графики сравнения теоретических и экспериментальных данных температуры анолита на выходе из электроактиватора при $Q = 2,5$ л/мин

Таблица 3.1 – Результаты сравнения теоретических и экспериментальных значений температуры анолита на выходе из электроактиватора при разной производительности Q

Производительность Q , л/мин	Сила тока, А	Температура (теория), °C	Температура (эксперимент), °C	Относительная ошибка, %
1,5	0	20	20	0
	5	21,7	22,5	3,6
	10	26,7	26,3	1,5
	15	35	34	2,9
	20	46,6	43,5	6,7
2	0	20	20	0
	5	21,3	22,2	4,1
	10	25,1	25,9	3,1
	15	31,4	33	4,8
	20	40,2	39	3,0
2,5	0	20	20	0
	5	21	21,5	2,3
	10	24,1	24,9	3,2
	15	29,2	30,5	4,3
	20	36,4	37,5	2,9

Также были произведены замеры напряжений между электродами при разном расходе и силе тока и проведено их сравнение с теоретическими (см. табл. 3.2 и рис. 3.9).

Таблица 3.2 - Сравнение теоретических и экспериментальных напряжений между электродами при разных значениях тока и расхода

Расход Q, л/мин	1,5				2				2,5			
Сила тока, А	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
Напряжение (теория), В	23,3	54,5	98,9	215	22,2	50,2	89,5	163	21,6	46,9	82,1	132
Напряжение (эксперимент), В	24	65	105	201	25	60	98	151	26	57	94	127

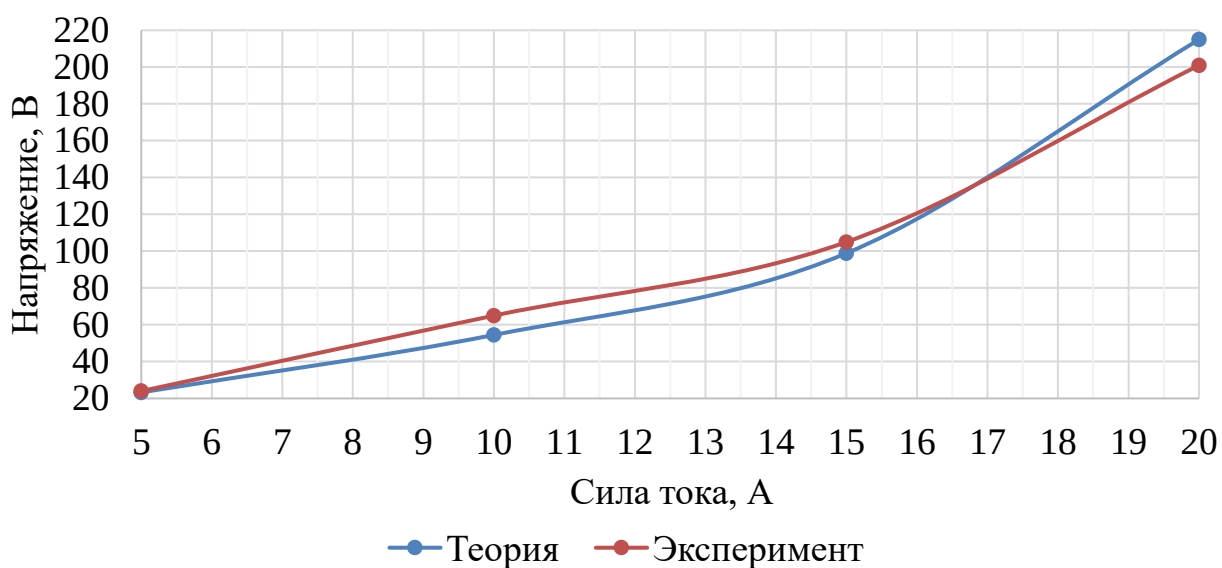


Рисунок 3.9 – ВАХ при Q = 1,5 л/мин

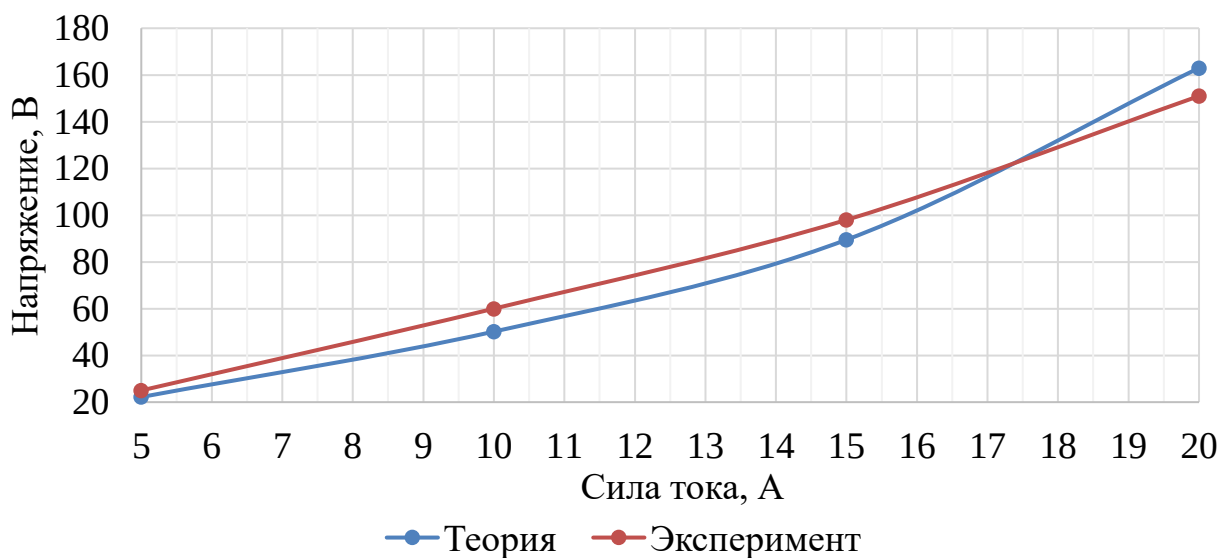


Рисунок 3.10 – ВАХ при Q = 2 л/мин

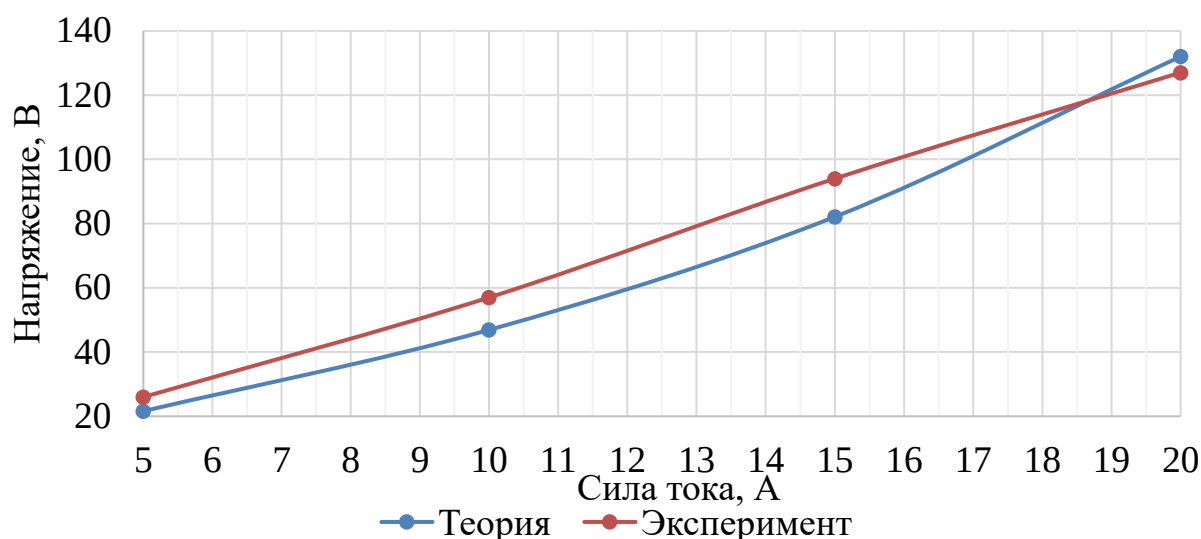


Рисунок 3.11 – ВАХ при $Q = 2,5$ л/мин

Сравнение теоретических и экспериментальных значений напряжений также показало отсутствие между ними статистических различий (приложение 3). Таким образом, наблюдается хорошее совпадение экспериментальных напряжений с напряжениями, полученными при компьютерном моделировании (относительная ошибка составила не более 9,1 %), с максимальным отклонением около 12 В.

Проведены измерения pH получаемых анолитов для их сопоставления с токами из компьютерной модели (рис. 3.12 и табл. 3.3).

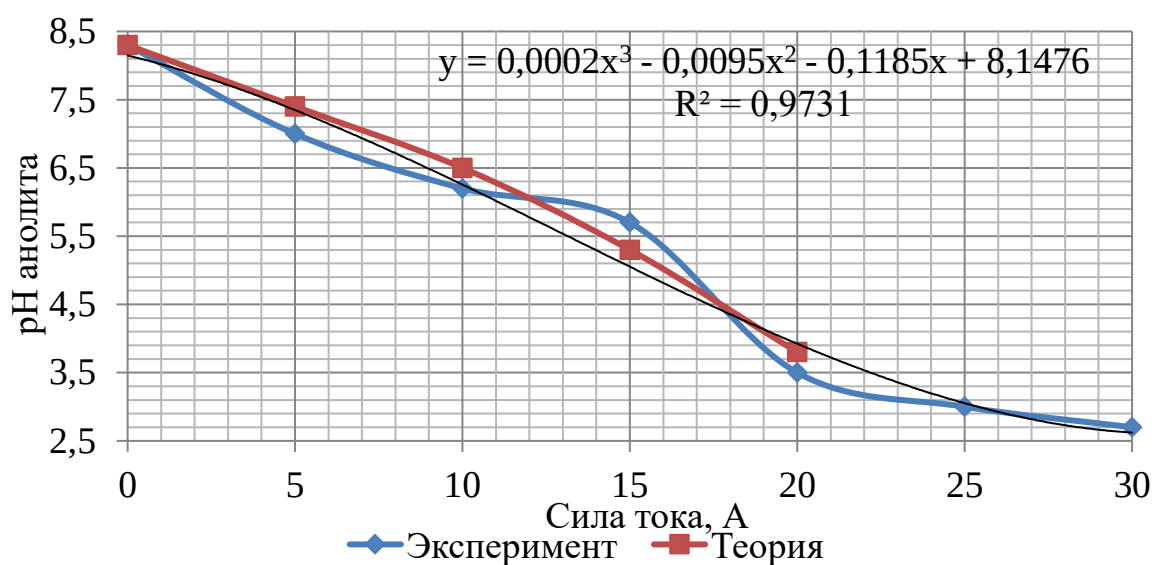


Рисунок 3.12 – График изменения pH при разной силе тока через электроактиватор при $Q = 1,5$ л/мин

Таблица 3.3 – Результаты измерений pH получаемых анолитов при разных значениях токов через электроактиватор при $Q=1,5$ л/мин

Сила тока, А	0	5	10	15	20	25	30
pH (эксперимент)	8,3	7	6,2	5,7	3,5	3	2,7
pH (теория)	8,3	7,4	6,5	5,3	3,8	-	-
Напряжение (эксперимент)	0	24	65	105	201	224	247

Представленные данные об изменении pH в зависимости от силы тока через проточный электроактиватор хорошо согласуются с данными, полученными при работе с непроточной установкой в [16]. Также как и на рис. 1.7 в диапазоне pH от 6 до 5,5 увеличение тока (в случае проточной установки) или времени (в случае непроточной установки) не приводит к существенному изменению pH. Дальнейшее увеличение воздействия на воду приводит к резкому падению pH до 3-3,5, что, по всей видимости, связано с электрохимическими процессами в воде. Принятый при компьютерном моделировании диапазон токов от 5 до 20 А при $Q = 1,5$ л/мин соответствует диапазону pH от 7 до 3,5 соответственно. Как видно из табл. 3.3 и рис. 3.12 получить pH ниже 3-х возможно при токе в 30 А. При этом температура получаемых анолитов, согласно проведенным нами экспериментальным исследованиям, будет более 50°C , что повлияет на растворимость озона в них. Поэтому, чтобы оценить необходимость получения столь низких pH, а также подтвердить или опровергнуть предположение, сделанное в п. 1.4 о возможности использовать для обработки пчелиных ульев и пчелоинвентаря не сильноокислые растворы с pH менее 3, а слабоокислые растворы анолитов с pH от 5 до 6, проведены соответствующие исследования. Такие исследования проводились нами совместно с кафедрой биотехнологии, биохимии и биофизики Кубанского ГАУ, при этом анализировалось влияния параметров процесса получения озоносодержащего анолита в потоке воды на выживаемость плесневого гриба *Penicillium sp*, отмечена также возможность снижения мощности установки.

3.3 Результаты влияния параметров процесса получения озоносодержащего анолита на выживаемость плесневого гриба *Penicillium sp.*, а также итоги полевых испытаний разработанного проточного электроактиватора

Для оценки эффективности применения анолита барботированного озоном вначале был проведен эксперимент, при котором на выбранный тест-объект осуществлялось влияние только анолита с рН равным 6, 4 и 2,7. Результаты представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты влияния анолита с различным рН на выживаемость плесневого гриба *Penicillium sp.*

№	рН	Число <i>Penicillium sp.</i> после воздействия, КОЕ/см ³	Выживаемость <i>Penicillium sp.</i> после воздействия, %
Контроль	8,3	$1004 \cdot 10^9$	100
1	6	$932 \cdot 10^9$	92,8
2	4	$809 \cdot 10^9$	80,6
3	2,7	$849 \cdot 10^9$	84,6

Из табл. 3.4 видно, что получаемый анолит снижает число колоний тест-объекта не более чем на 20 %. Это обосновывает необходимость добавления в раствор озона с целью усиления его дезинфицирующего воздействия. Результаты эксперимента по изучению влияния озоносодержащего анолита на *Penicillium sp.* приведены на рис. 3.13 и в табл. 3.5. Наилучший результат (выживаемость менее 40 %) был получен при рН = 4 и Q = 1,5 л/мин. Добавление озона в воду приводит к увеличению дезинфицирующей способности получаемого анолита на 40 %. Видно, что в опытах с низким значением рН анолита равным 2,7 не оказывается сильного воздействия на выживаемость *Penicillium sp.* Эффективность этих растворов хуже в сравнении с растворами при рН равном 4 и 6. По всей видимости, это связано с большими температурами анолитов при низких рН и соответственно слабой растворимостью в них озона.

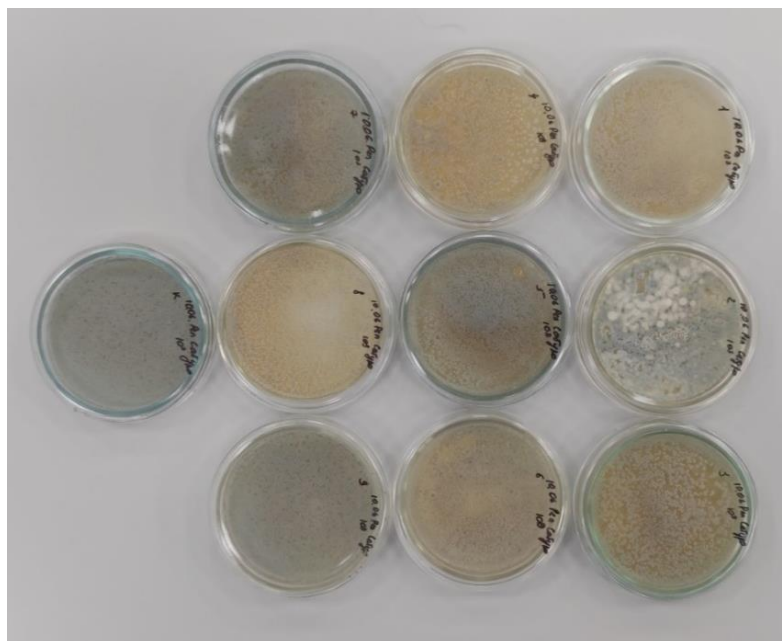


Рисунок 3.13 – Фотография одной из повторностей эксперимента по изучению влияния pH озоносодержащего анолита и расхода воды через электроактиватор на выживаемость плесневого гриба *Penicillium sp.*

Таблица 3.5 – Матрица эксперимента по изучению влияния pH озоносодержащего анолита и расхода воды через электроактиватор на выживаемость плесневого гриба *Penicillium sp.*

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

Из результатов эксперимента также видно, что при увеличении расхода и при неизменном рН выживаемость тест-объекта увеличивается. Это, по нашему мнению, связано с уменьшением концентрации озона в растворе и было предсказано компьютерной моделью и подтверждает математическую модель барботирования потока анолита озоном.

По результатам исследования были построены регрессионные поверхности, показанные на рис. 3.14 и 3.15 и получено регрессионное уравнение:

$$y_1 = 64,7391 - 33,7959 \cdot x_1 + 55,2216 \cdot x_2 + 4,2164x_1^2 - 3,5090 \cdot x_1 \cdot x_2 - 6,7333 \cdot x_2^2. \quad (3.1)$$

Основные результаты проведенного нами регрессионного анализа приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты проведенного регрессионного анализа влияния параметров приготовления раствора анолита на выживаемость плесневого гриба *Penicillium sp.*

Множественный коэффициент корреляции $R = 0,97$; коэффициент детерминации $R^2 = 0,95$; скорректированный коэффициент детерминации $R^2_{\text{СКОР}} = 0,86$; критерий Фишера $F(5,3) = 10,91$ уровень значимости $p < 0,038$; стандартная ошибка оценки: 3,76						
	БЕТА	Стд. Ош. БЕТА	В	Стд. Ош. В	Критерий Стьюдента $t(3)$	p – уровень значимости
			64,7391	49,05863	1,31963	0,278628
x_1	-4,82722	1,453655	-33,7959	10,17719	-3,32075	0,045029
x_2	2,37245	1,876902	55,2216	43,68723	1,26402	0,295507
$x_1 \cdot x_2$	-1,20583	0,776827	-3,5090	2,26061	-1,55225	0,218409
x_1^2	5,33305	1,302333	4,2164	1,02965	4,09500	0,026335
x_2^2	-1,16013	1,831316	-6,7333	10,62890	-0,63349	0,571410

Согласно табл. 3.6 множественный коэффициент корреляции R получен равным 0,973 это говорит о том, что связь между вариацией результативного показателя y_1 и вариацией факторных признаков x_1 и x_2 сильная. Согласно полученному значению множественного коэффициента детерминации $R^2 = 0,94$

% вариации отклика y_1 объясняются факторами x_1 и x_2 . Скорректированный коэффициент детерминации $R^2_{\text{СКОР}}$ равный 0,86 также достаточно высок и говорит о высоком качестве полученной регрессионной модели. Табличное значение критерия Фишера $F_{\text{ТАБЛ}}$ при $\nu_1 = 5$, $\nu_2 = 3$ и при уровне значимости $p = 0,05$ равно 9,01, что меньше расчетного $F_{\text{РАСЧ}} = 10,91$. Это говорит об адекватности полученной регрессионной модели, т.е. о ее статистической значимости. Наибольшее влияние на выживаемость тест-объекта оказывает рН. Это следует из того, что наибольшую статистическую значимость имеют коэффициент уравнения при x_1^2 и фактор x_1 (рН), т.к. они имеют низкие уровни p (табл. 3.6). На это также указывает высокий коэффициент БЕТА у фактора x_1 .

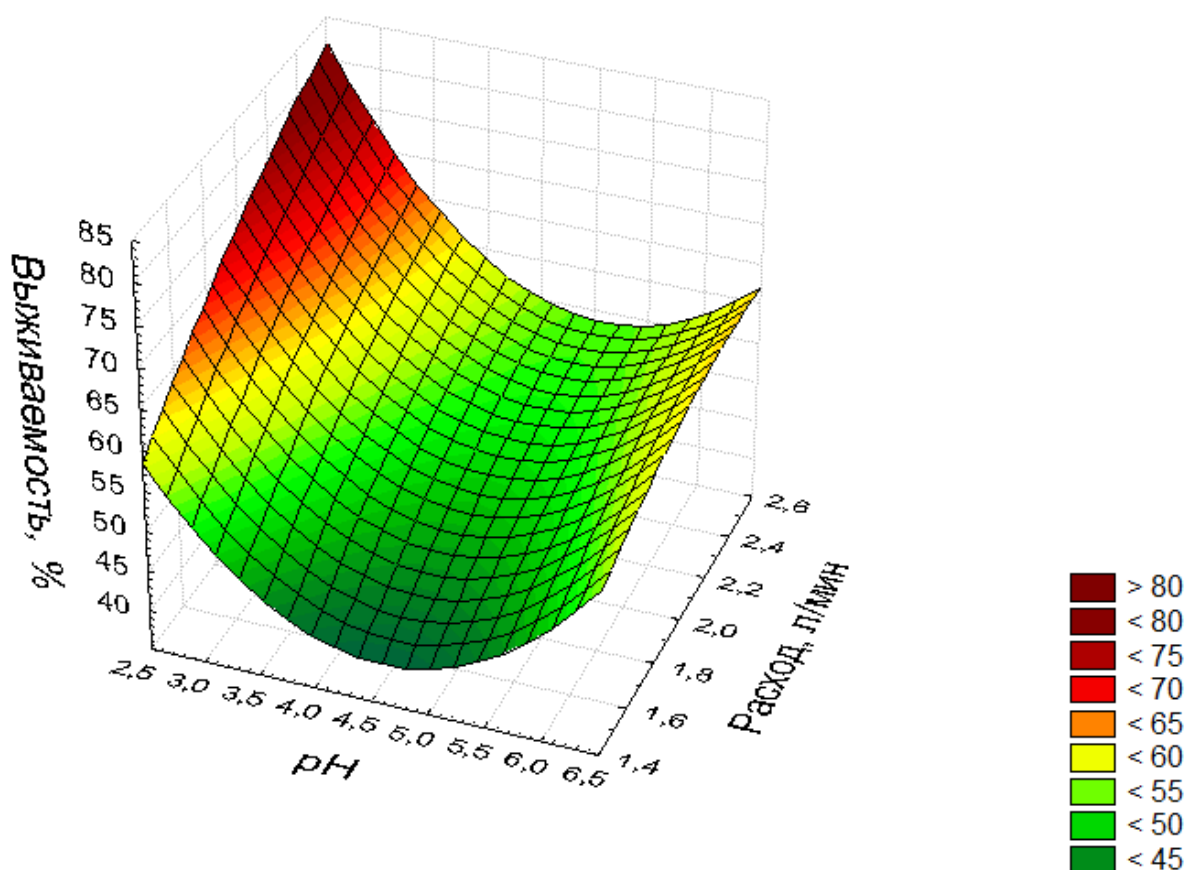


Рисунок 3.14 – Изображение поверхности, полученной по регрессионной модели (3.1) описывающей влияние рН озоносодержащего анолита – x_1 и расхода воды через электроактиватор – x_2 на выживаемость плесневого гриба *Penicillium sp.* – y_1

Для определения рациональных параметров обработки пчелиных ульев от микозов пчел поверхность, изображенная на рис. 3.14 была спроецирована на факториальную плоскость (рис. 3.15).

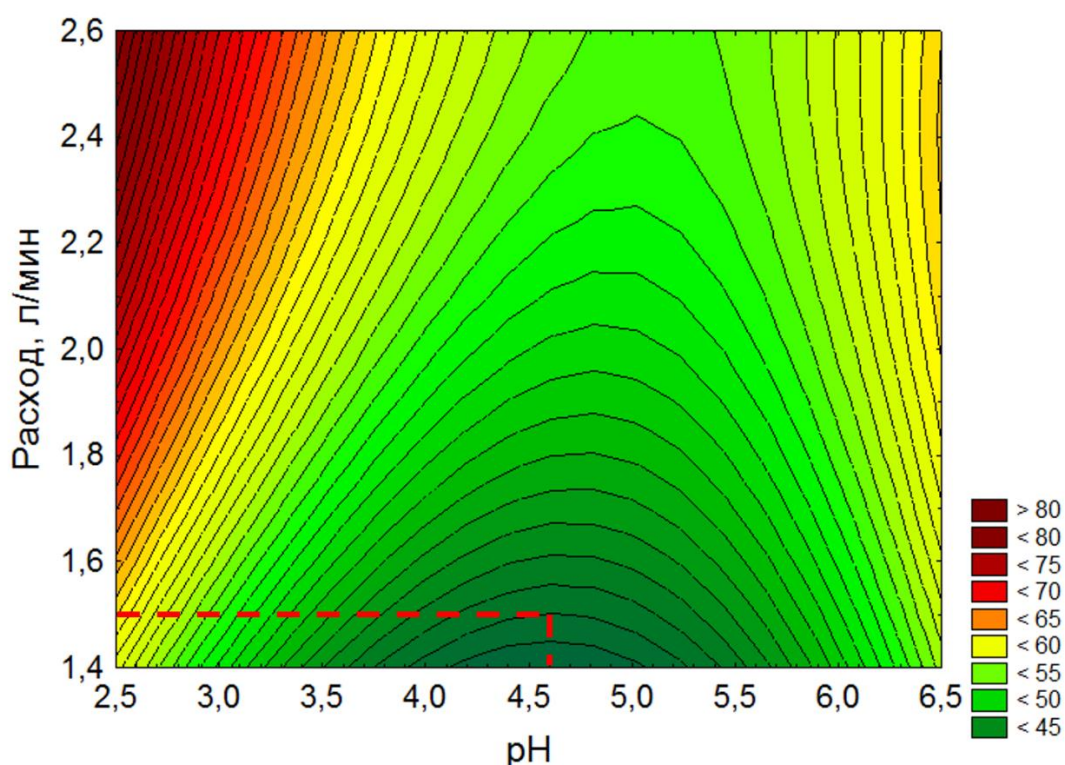


Рисунок 3.15 – Проекция поверхности представленной на рис. 3.14 на факториальную плоскость

Как видно из представленной проекции самая низкая выживаемость тест-объекта находится в диапазоне pH от 4,5 до 5 и при Q равном 1,5 л/мин. Наименьшее ее значение достигается при pH равном 4,6. Таким образом, экспериментально доказано, что значения pH озоносодержащего анолита ниже 4-х отрицательно влияют на обработку пчелиных ульев от микозов пчел. Так как получение таких значений pH связано с нагревом раствора свыше 50°C в результате чего озон слабо растворяется в растворе, что в свою очередь приводит к снижению дезинфицирующих свойств анолита. Помимо этого, в анолите с pH ниже 4-х ионы хлора активно переходят в газообразное состояние, что снижает количество его соединений в растворе и также приводит к снижению его дезинфицирующей способности. Как и предполагалось ранее, наилучшим значением расхода воды через

электроактиватор является Q равное 1,5 л/мин. При найденных рациональных параметрах получения озоносодержащего анолита: pH от 4,5 до 5 и $Q = 1,5$ л/мин мощность проточного электроактиватора воды составляет от 2 до 3 кВт. Также, исходя из проведенных нами компьютерного моделирования процесса барботаж анолита озоном и экспериментальных исследований по получению анолитов, предлагается следующий режим работы электроактиватора: запуск электролиза и выход на установившейся режим по необходимому значению pH анолита в течение 30 секунд (за этот промежуток времени устанавливается температура раствора), что позволяет запустить далее процесс барботаж путем включения озонатора, концентрация озона на выходе из которого должна составлять 2000 мг/м³. Выход на установившейся режим по озону составляет 30-40 секунд и таким образом общее время выхода на установившейся режим работы установки занимает 1 минуту.

Полевые испытания разработанного электроактиватора проводили в ООО «Предприятие по пчеловодству «Краснодарское». Для испытаний было отобрано 10 пчелиных ульев с максимально близкими по силе пчелиными семьями: 5 контрольных, и 5 опытных. После зимовки контрольные улья были продезинфицированы раствором, содержащим перекись водорода и муравьиную кислоту, механически обработаны и обожжены. В сезон их обрабатывали химическими препаратами против гнильцовых заболеваний (преимущественно «Оксибатоцидом», который содержит в своем составе антибиотики). Опытные улья после зимовки были обработаны озоносодержащим анолитом с pH = 5. Они также подвергались механической обработке и обжиганию. Профилактические обработки опытных ульев озоносодержащим анолитом методом опрыскивания ульев и соторамок, а также пчелоинвентаря используемого для их обслуживания проводились 5 раз за сезон (включая обработку ульев после зимовки). Часть получаемого католита с pH=11 разбавляли водопроводной водой в пропорции 1:3, чтобы не допустить солевых отравлений и использовали для поения пчел в опытных

ульях. В результате испытаний установлено, что внедрение разработанного электроактиватора позволило (см. приложение 5):

- сократить заболеваемость пчел в опытных ульях в 2 раза, что в свою очередь позволило сократить во столько же количество используемых антибиотиков и повысить качество меда;
- визуально снизить заклещенность пчел;
- повысить медопроизводство опытных по сравнению с контрольными ульев на 12 %.

3.4 Разработка принципиальной электрической схемы управления проточным электроактиватором воды и алгоритма его работы

На основании предложенного в п. 3.3 режима работы проточного электроактиватора для профилактических обработок пчелиных ульев была разработана принципиальная электрическая схема его управления. Она разделена на 2 составляющие (рис. 3.16 и рис. 3.17). Первая составляющая (рис. 3.16) является схемой управления работой проточного электролизера воды и по своему функционалу может работать отдельно. Схема реализована на базе микроконтроллера PIC16F1827 и она позволяет задавать различные уставки тока до 25 А. Регулирование мощности электролизера осуществляется при помощи силового тиристора VS1 путем изменения угла его отпирания. Управление тиристором происходит при помощи высоковольтной оптопары Q1 и микроконтроллера. Для перехода сетевого напряжения через ноль используется оптопара Q2, выход которой подключен к микроконтроллеру. Для контроля выходного напряжения электролизера применяется делитель напряжения, собранный на резисторах R22, R24 и R25. На резисторе R26 и конденсаторе C11 собран фильтр первого порядка, выход которого буферизирован при помощи операционного усилителя DA1. После этого сигнал подается на один из каналов АЦП микроконтроллера. Для

контроля тока потребления электролизера используется шунт R29, напряжение с которого подается на усилитель, собранный на одной половине операционного усилителя DA2.2. После фильтра первого порядка, выполненного на элементах R23 и C9, сигнал подается на буфер, выполненный на другой половине операционного усилителя DA2.1 и далее подается на один из каналов АЦП микроконтроллера. Для точной настройки опорного напряжения АЦП микроконтроллера используется подстроечный резистор R15. Схема имеет два источника питания. Источник питания 5 В собран на основе микросхемы DA3 и используется для питания микроконтроллера и всех остальных активных элементов схемы. Источник напряжения 12 В собран на основе микросхемы DA4 и используется для питания вентилятора охлаждения F1.

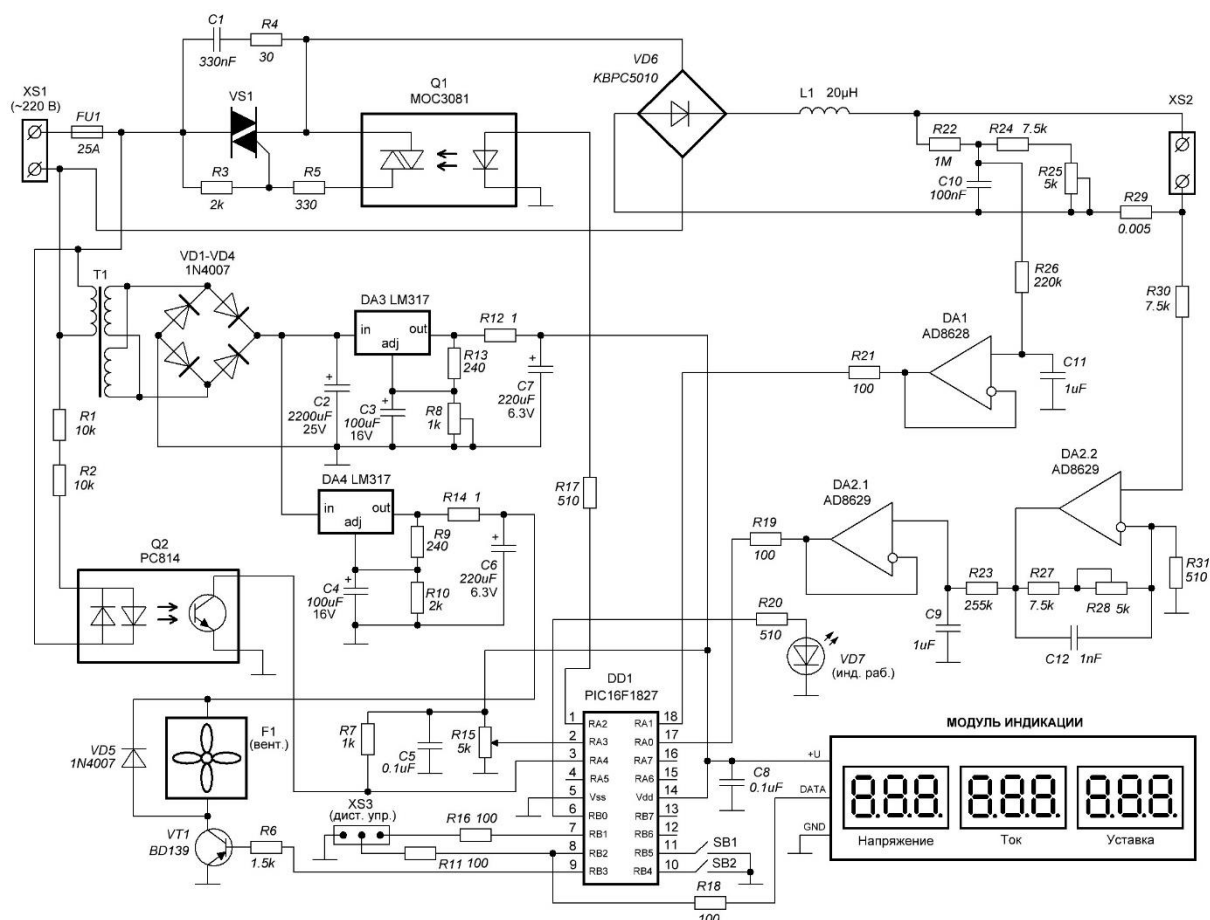


Рисунок 3.16 – Принципиальная электрическая схема управления электролизером

Вторая составляющая (рис. 3.17) является схемой управления электроактиваторной установкой. Она реализована на базе такого же микроконтроллера, что и предыдущая схема. Между ними установлена дистанционная связь через клеммы XS5 (рис. 3.17) и XS3 (рис. 3.16).

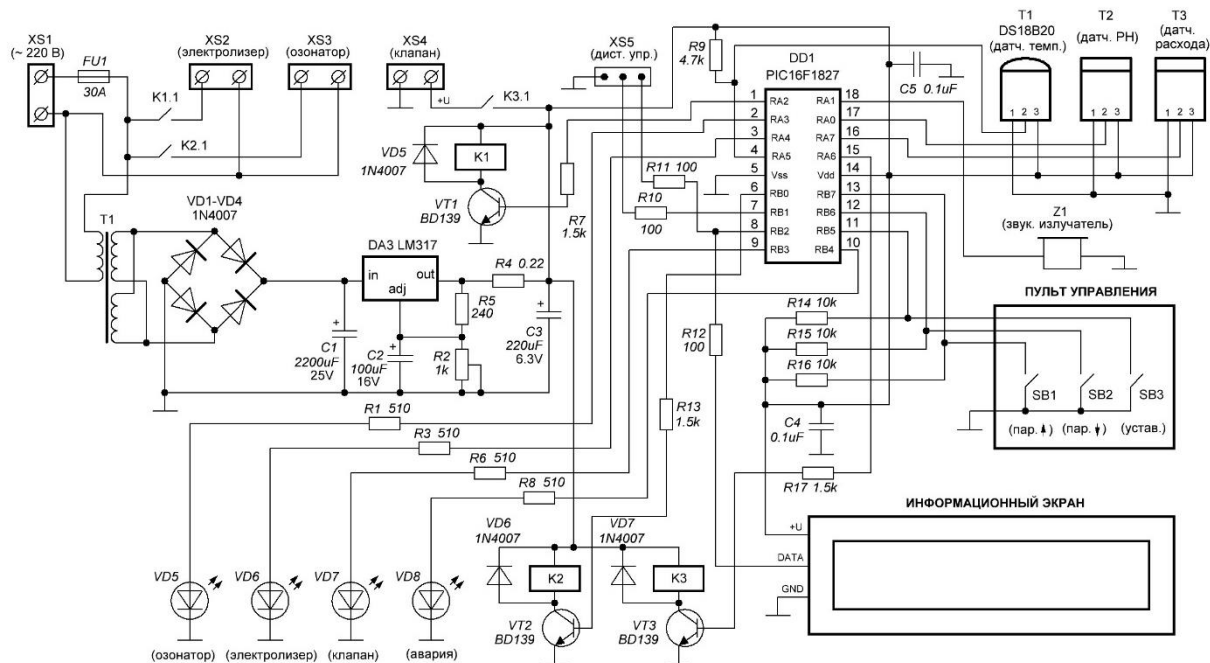


Рисунок 3.17 – Принципиальная электрическая схема управления проточным электроактиватором воды для профилактических обработок пчелиных ульев

Микроконтроллер на рис. 3.17 является управляющим и с помощью него осуществляется управление всей электроактиваторной установкой посредством внесения в него необходимых параметров работы, как-то: требуемый pH, расход и количество воды, временные задержки и температурная уставка.

К управляющему микроконтроллеру на рис. 3.17 подключены:

- датчик pH, аналоговый, питающее напряжение: 3,3-5,5 В;
- датчик температуры DS18B20, питающее напряжение: 5 В;
- звуковой излучатель пьезоэлектрический;
- реле электромагнитное 5 В/220 В для включения озонатора;
- электромагнитный клапан, нормально открытый для регулирования потока воды, питающее напряжение 5 В;

- расходомер, питающее напряжение: 5 В;
- плата управления электролизером путем регулирования силы тока, которая завязана на обратную связь с датчиком pH (рис. 3.6);
- LCD 2x16 для отображения силы тока, pH, температуры, расхода воды и задания, необходимых уставок перед началом работы;
- кнопочный пост из 3-х кнопок для ввода уставок;
- светодиод, сигнализирующий о подачи питания на электролизер;
- светодиод, сигнализирующий о подачи питания на озонатор;
- светодиод, сигнализирующий о подачи питания на электромагнитный клапан;
- светодиод аварии.

Алгоритм работы установки следующий (рис. 3.18). С помощью кнопочного и LCD последовательно задается необходимый pH раствора и необходимое количество воды. Далее включается электролизер, на который подается максимальное значение тока – 25А и затем происходит снижение тока по приближению к заданному значению pH. Как только нужный pH будет достигнут (что занимает не более 30 секунд по результатам проведенных экспериментальных исследований), включается озонатор. Происходит отсчет ещё 30 секунд, после чего звуковой излучатель издает сигнал в течение 5 секунд о начале процесса получения раствора. После того как звуковой излучатель перестал подавать сигнал, расходомер начинает процесс подсчета расхода воды. Как только нужное количество воды будет получено питание с электролизера и озонатора снимается и одновременно подается на электромагнитный клапан для остановки потока воды. Далее опять включается звуковой излучатель и издает сигнал в течение 5 секунд о прекращении приготовления раствора.

Датчик температуры DS18B20 установлен в выходном патрубке анодной камеры и нужен для отслеживания аварийных ситуаций, при

которых температура воды становится больше 50 °С, что сигнализируется сигналом зуммера и горением аварийного светодиода.

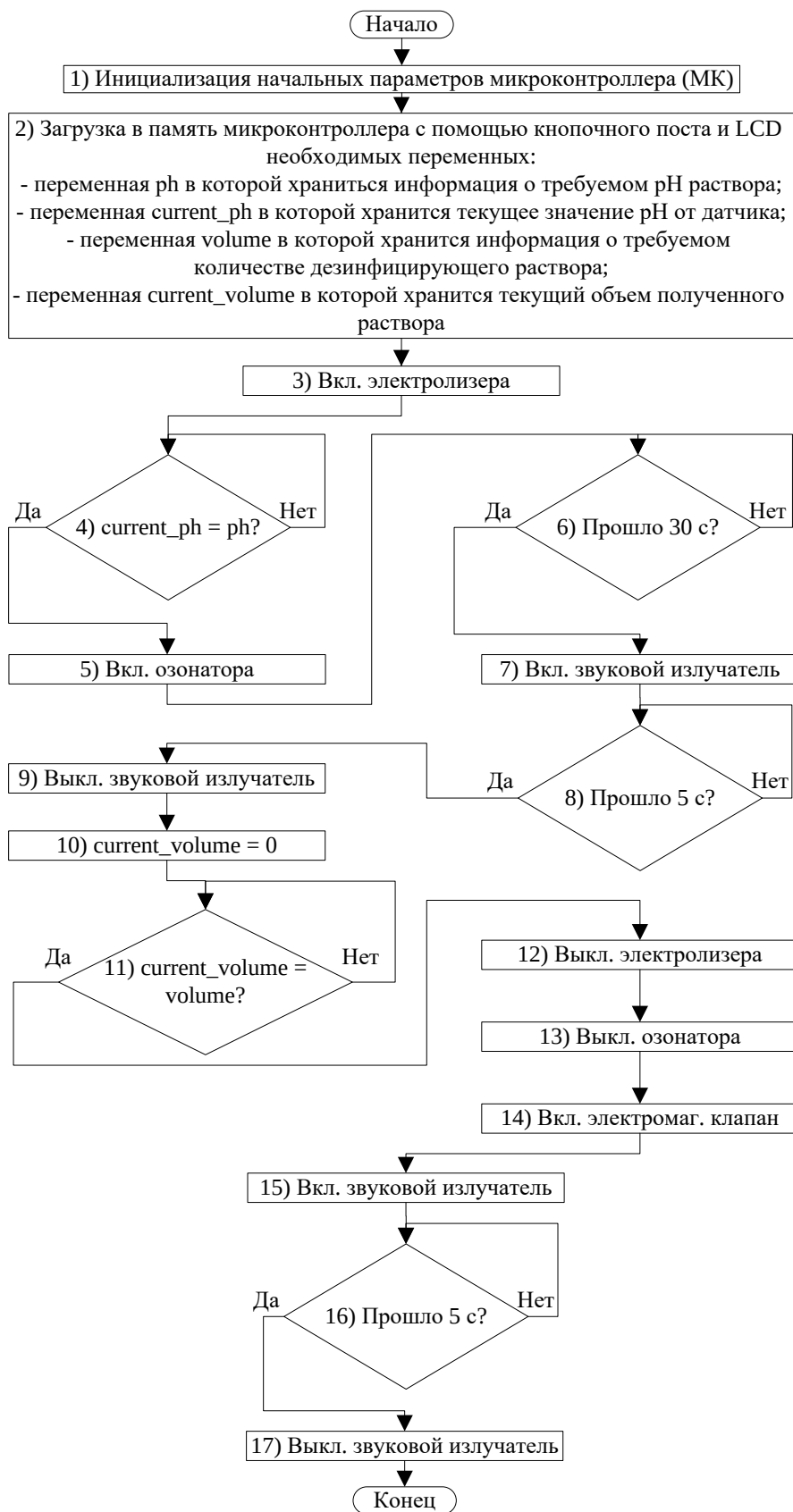


Рисунок 3.18 – Блок-схема алгоритма управления электроактиватором

3.5 Экономическая эффективность внедрения проточного электроактиватора для профилактической обработки ульев на пасеке в 50 пчелиных семей

Содержание пчел сопряжено с большими трудозатратами. Помимо операций на получение продуктов пчеловодства и их переработку пчеловодами затрачивается много сил на предотвращение болезней пчел. Это достигается профилактическими обработками их жилищ. Такие обработки обязательно проводятся после зимовки насекомых, дабы предотвратить развитие грибковых заболеваний и плесени внутри ульев. Их осуществление в весенний период позволяет набрать пчелиным семьям силу, что позволяет увеличить производительность пасеки, а также увеличить резистентность к инфекционным и инвазионным заболеваниям.

Предлагаемый в данной работе способ обработки ульев на пасеке позволяет проводить быструю обработку ульев за счет использования проточной установки, которая сокращает время на получение раствора по сравнению с непроточной установкой, как например в работе [16]. Экономическую эффективность будем определять для пасеки на 50 пчелиных ульев. Для этого рассчитаем стоимость изготовления макетного образца установки. Затраты на НИОКР определим согласно следующей формуле [54]:

$$S_{\text{НИОКР}} = Z_o + Z_{\text{дон}} + H + Z_{\text{э}} + P_H + C_M + C_K \quad (3.2)$$

где Z_o – основная заработная плата разработчиков и конструкторов, руб.; $Z_{\text{дон}}$ – дополнительная стимулирующая заработная плата, руб.; $Z_{\text{э}}$ – затраты на энергоресурсы при проведении исследований и изготовления макета, руб.; H – нормативные начисления на зарплату, руб., P_H – накладные расходы при исследованиях, руб.; C_M , C_K – стоимость материалов и комплектующих макетного образца, руб.

Выбор материалов, разработку конструкции установки, моделирование, проведение экспериментальных исследований проведут три человека с месячным окладом в 90 тыс. рублей в течение 3 месяцев. В соответствии с

[34] стимулирующую надбавку примем равной 10%. Начисления на зарплату составят 30% от фонда оплаты труда. Накладные расходы примем в размере от 50% от общего фонда оплаты труда (патентный поиск, оформление изобретения, оформление отчета НИР, публикация статей, промежуточные варианты конструкции, покупка измерительных приборов). Стоимость энергоресурсов возьмем укрупненно в размере 10% от основной заработной платы.

На изготовление макетного образца понадобятся следующие компоненты и услуги: бытовой озонатор, компоненты проточного электроактиватора (корпус, стальной катод, покрытие стального анода рутением во избежание выноса материала электрода в воду), покупка системы трубопроводов с запорно-регулирующей арматурой, печать трубки Вентури на 3D-принтере, расходомер воды, источник питания для электроактиватора, измеритель проводимости воды и ее pH. Расходы на создание макетного образца показаны в табл. 3.7.

Таблица 3.7 – Общие расходы на НИОКР для изготовления макетного образца системы группового озонирования ульев

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Итого, тыс. руб.
1	Бытовой электроозонатор производительностью 2 г/ч	шт.	1	2,437
2	Расходомер воды YF-S401	шт.	1	0,518
3	Печать трубки Вентури	шт.	1	1,00
4	Покрытие рутением стального анода 175x285x2 мм	шт.	1	35,00
5	Трубопровод с запорно-регулирующей арматурой	-	-	5,00
6	Источник питания для электроактиватора	шт.	1	10,00
7	Измеритель проводимости и pH воды EC500	шт.	1	37,970
8	Катод из нержавеющей стали, 175x285x2 мм	шт.	1	1,00
5	Итого материальные затраты на всю установку	шт.	1	92,925
6	Заработная плата с начислениями, в том числе:	чел.	3	1 158,3
	- основная			810,00
	- дополнительная			81,00
7	Накладные расходы			579,15
8	Затраты на энергоресурсы			81,00
9	Итого			1911,375

После проведения НИОКР можно подготавливать и организовывать малое серийное производство электроактиваторов для профилактической обработки ульев на предприятии. Как правило, цена за такие установки превышает цену на материалы в 2 раза. Поэтому примем цену на электроактиватор – 180 тыс. руб.

Экономические расчеты производим на примере пасеки в 50 ульев. Из [16] известно, что на 20 ульев требуется 10 л анолита, которые готовятся на непроточной установке в течение 5 часов. Т.е. на 1 улей требуется 0,5 л анолита. Тогда на пасеку в 50 ульев требуется 25 л. Таким образом, время на приготовление анолита предлагаемым в данной работе способом (при производительности проточной установки по анолиту 0,75 л/мин или $Q = 1,5$ л/мин) для пасеки в 50 ульев сократится с 12,5 часов до 35 минут (с учетом 1 минуты для выхода установки на установившийся режим и времени для создания небольшого запаса раствора связанного с неизбежными потерями при обработке). Применение электроактивированных растворов анолита позволяет сократить в 2 раза затраты на ветеринарные препараты, что повышает качество меда [16]. Поэтому экономический эффект рассчитаем для двух вариантов: за счет реализации меда по повышенной цене, т.к. применение разработанной установки повышает экологическое качество меда вследствие снижения в нем токсических веществ – антибиотиков при содержании пчел; за счет увеличения медопродуктивности до 12 % на основании проведенных полевых испытаний установки (см. приложение 5). Определим доходы на 5 лет по двум вариантам на основании данных, приведенных в [54]. Летом этого года натуральный мед в России подорожал на 30-50% из-за многих причин, основной из которых является массовая гибель пчел [59]. Поэтому цены на мед были скорректированы относительно этого факта. Результаты расчетов представлены в табл. 3.8. Определим затраты при работе установки за 1 сезон. В качестве таких затрат будут: расходы на электроэнергию, накладные расходы. При эксплуатации новой установки примем накладные расходы, для проведения технических

обслуживаний и возможных текущих ремонтов, а также замену диафрагмы в размере 10 тыс. руб.

Таблица 3.8 – Результаты по доходности пчеловода на 5 лет для пасеки на 100 пчелиных ульев по 2-ум вариантам

№	Показатели	2024	2025	2026	2027	2028
1	Стоимость меда при реализации на внутреннем рынке без использования установки, руб./кг	600	750	825	900	975
2	Стоимость меда при реализации на внутреннем рынке с использованием установки, руб./кг	650	820	900	980	1100
3	Средняя медопродуктивность по меду без использования установки, кг/пчелиную семью	30	25	33	25	30
4	Средняя медопродуктивность по меду с использованием установки, кг/пчелиную семью	33,6	27,5	36,3	26,75	33,6
5	Дополнительный доход от реализации меда по 1-му варианту, тыс. руб.	75	87,5	123,75	100	187,5
6	Дополнительный доход от реализации меда по 2-му варианту, тыс. руб.	108	93,75	136,125	78,75	175,5

Потребление электроэнергии составит:

$$W_{год} = P_{уст} \cdot t_1 \cdot n = 2,33 \cdot 1,17 \cdot 5 = 13,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (3.3)$$

где $P_{уст}$ – мощность установки, 2,33 кВт; t_1 – время работы установки для получения раствора на 1 обработку, 1,17 ч; n – количество обработок, 5 шт.

В среднем по Российской Федерации тариф на электрическую энергию составляет 4,79 руб./кВт·ч [122]. Таким образом, за 1 сезон на электроэнергию будет затрачено 65 рублей. Общие затраты за 1 сезон составят 10 065 руб.

Оценку экономической эффективности от внедрения электроактиватора на пасеке посчитаем на основании чистого дисконтированного дохода по методике, представленной в [106]. Чистый дисконтированный доход или NPV рассчитывается по формуле:

$$NPV = \sum (Cf_t / (1+r)^t) - I_0 \quad (3.4)$$

где Cf_t – денежный поток за период, д.е.; r – ставка дисконтирования; t – период расчёта, год; I_0 – изначальные вложения инвестора, д.е.

Предполагаем, что сумму в 180 тыс. рублей на покупку электроактиватора пчеловод возьмет в виде банковского кредита под 20 % годовых (Γ). С учетом налога на прибыль НП = 0,2 о.е. и налогового щита НЩ (равен 1 если есть и 0 если нет), средневзвешенная стоимость капитала в данном случае $WACC = \Gamma \cdot (1 - \text{НП} \cdot \text{НЩ}) = 20\% \cdot (1 - 0,2 \cdot 1) = 16\%$. Данное значение возьмем как значение ставки дисконтирования. Результаты расчета экономической эффективности от внедрения электроактиватора по 1-му варианту показаны в табл. 3.9 и рис. 3.19 и 3.20. По 2-му варианту в табл. 3.10 и рис. 3.21 и 3.22. Шаг инвестирования равен 1 году. Также результаты расчетов показаны в табл. П4.1 и П4.2.

Таблица 3.9 – Результаты расчета экономической эффективности от внедрения электроактиватора на пасеке в 50 пчелиных ульях по варианту 1

Ставка дисконтирования	D	16,00%
Число шагов инвест. проекта в год	N	1
Суммарные инвестиции	I_0	180 000,00 руб.
Чистый доход	ЧД	353 490,00 руб.
Чистый дисконтированный доход	NPV	201 854,10 руб.
Внутренняя норма доходности	IRR	84,50%
Модифицированная внутренняя норма доходности	MIRR	53,04%
$ROI = (\text{Чистый доход}) / \text{Inv}$	ROI	196,38%
Индекс прибыльности = NPV / Inv	PI	112,14%
Срок окупаемости (лет)	PBP	2,2
Дисконтированный срок окупаемости (лет)	DPBP	2,5

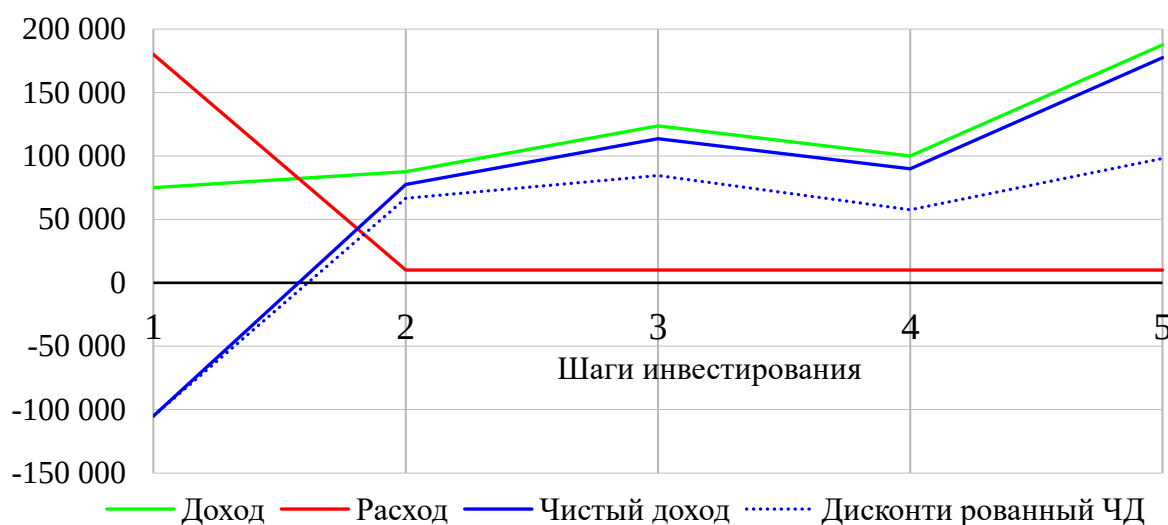


Рисунок 3.19 – Денежный поток по шагам для 1-го варианта

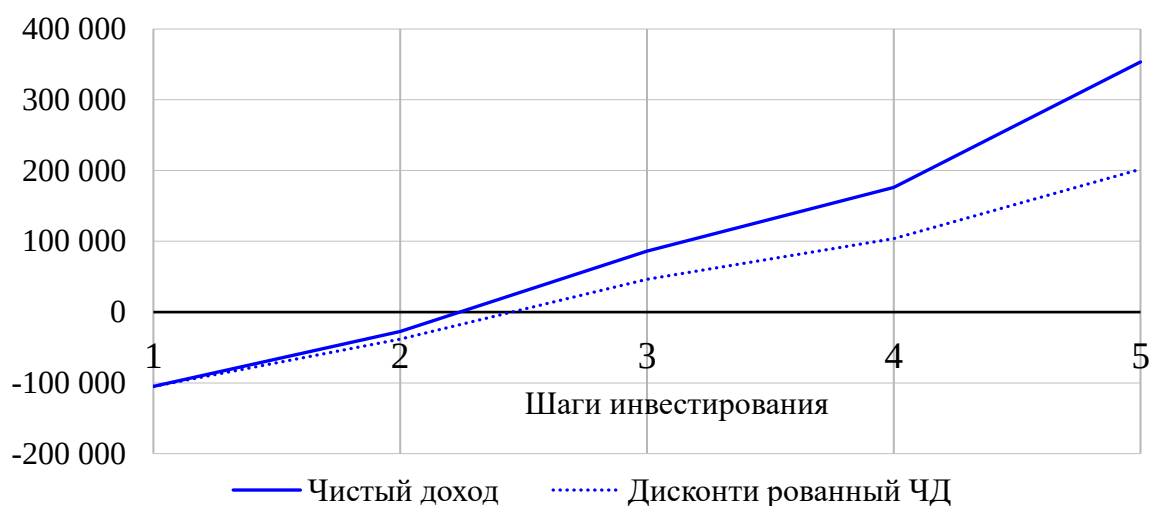


Рисунок 3.20 – Денежный поток нарастающим итогом для 1-го варианта

Таблица 3.10 – Результаты расчета экономической эффективности от внедрения электроактиватора на пасеке в 50 пчелиных ульях по варианту 2

Ставка дисконтирования	D	16,00%
Число шагов инвест. проекта в год	N	1
Суммарные инвестиции	Inv	180 000,00 руб.
Чистый доход	ЧД	371 865,00 руб.
Чистый дисконтированный доход	NPV	229 197,21 руб.
Внутренняя норма доходности	IRR	129,58%
Модифицированная внутренняя норма доходности	MIRR	67,50%
$ROI = (\text{Чистый доход})/Inv$	ROI	206,59%
Индекс прибыльности = NPV/Inv	PI	127,33%
Срок окупаемости (лет)	PBP	1,9
Дисконтированный срок окупаемости (лет)	DPBP	2,0

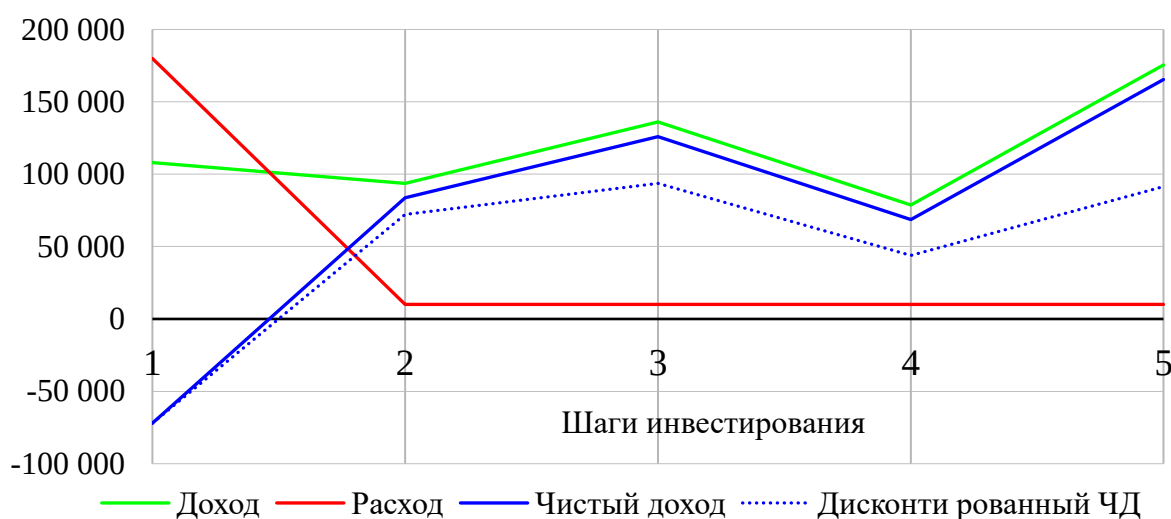


Рисунок 3.21 – Денежный поток по шагам для 2-го варианта

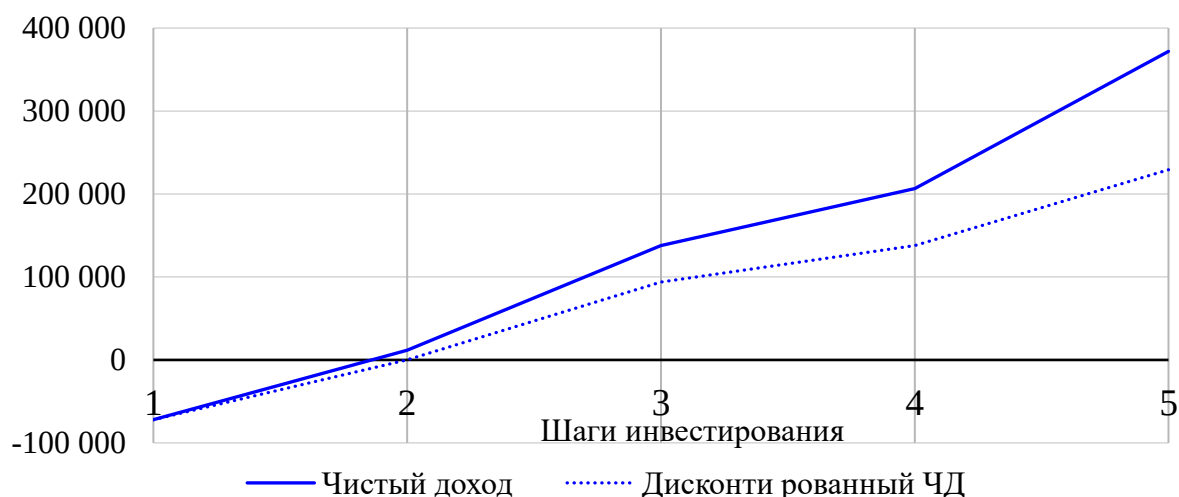


Рисунок 3.22 – Денежный поток нарастающим итогом для 2-го варианта

Величина NPV по 1-му и 2-му вариантам оказалась положительной и составила соответственно 202 тыс. руб. и 229 тыс. руб., что говорит о их экономической эффективности. Дисконтированный срок окупаемости составил по 1-му варианту – 2 года и 5 месяцев, по 2-му варианту – 2 года.

3.6 Выводы по главе

1. Изготовлен усовершенствованный проточный электроактиватор водного раствора для профилактической обработки ульев включающий: проточный диафрагменный электролизер воды и подключенную к входу его анодной камеры трубку Вентури для подачи озона.
2. Проведенные экспериментальные исследования установки показали, что при расходе воды через электроактиватор 1,5 л/мин концентрация растворенного озона в анолите на выходе из анодной камеры не превышает 0,01 мг/л, что подтверждает результаты математического моделирования.
3. Проведенные экспериментальные исследования по сопоставлению опытных данных с результатами моделирования показали следующее:

относительная ошибка по температуре озоносодержащего анолита не более 6,7 %, по напряжению, подаваемому на электроды не более 9,1 %; проведенное статистическое сравнение теоретических и экспериментальных данных по U-критерию Манна-Уитни подтвердило отсутствие статистических различий между ними.

4. Проведены экспериментальные исследования влияния параметров полученного озоносодержащего анолита при производительности озонатора 2 г/ч на выживаемость плесневого гриба *Penicillium sp.* в результате которых получено регрессионное уравнение и определено, что наименьшая выживаемость тест-объекта – 40 % достигается при pH в диапазоне от 4,6 до 5 и расходе воды через электролизер 1,5 л/мин. Регрессионный анализ модели показал, ее высокое качество – скорректированный коэффициент детерминации $R_{\text{СКОР}}^2 = 0,86$, а также ее адекватность – табличное значение критерия Фишера при $p = 0,05$ $F_{\text{ТАБЛ}} = 9,01$, что меньше расчетного $F_{\text{РАСЧ}} = 10,91$. Также проведено исследование выживаемости *Penicillium sp.* при использовании анолита не насыщенного озоном, которая составила – 80 %, что говорит о снижении активности раствора в 2 раза по сравнению с насыщенным раствором.
5. На основании полученных теоретических и экспериментальных результатов получен алгоритм работы электроактиватора в соответствии, с которым разработана принципиальная электрическая схема его управления на базе микроконтроллера PIC16F1827.
6. Проведенные полевые испытания проточного электроактиватора для профилактической обработки ульев показали: сокращение заболеваемости пчел в опытных ульях в 2 раза, что в свою очередь позволило сократить во столько же количество используемых антибиотиков и повысить качество меда; снижение заклешенности пчел; повышение медопроизводства опытных ульев по сравнению с контрольными на 12 %.

7. Экономическая эффективность внедрения разработанного проточного электроактиватора воды для пасеки в 50 ульев рассчитывалась по 2 вариантам. В первом варианте эффективность достигается за счет реализации меда по повышенной цене. При этом ЧДД составил 202 тыс. руб., а срок окупаемости 2,2 года. Во втором варианте экономическая эффективность достигается за счет увеличения медопродуктивности пасеки на 12 %. ЧДД составил 229 тыс. руб., а срок окупаемости 1,9 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

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

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

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

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

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

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

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

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

8. Проведенные полевые испытания проточного электроактиватора для профилактической обработки ульев показали снижение заболеваемости пчел в опытных ульях и сокращение в два раза использования антибиотиков. Экономическая эффективность применения проточного электроактиватора воды для пасеки в 50 ульев рассчитывалась по 2 вариантам: за счет реализации меда по повышенной цене и увеличения медопродуктивности

пасеки. По первому варианту ЧДД составил 202 тыс. руб., а срок окупаемости 2,2 года. По второму варианту ЧДД составил 229 тыс. руб., со сроком окупаемости капиталовложений 1,9 лет.

Рекомендации производству

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

Перспективы дальнейшей разработки темы

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев, Л. Н. Обеззараживание воздушной среды и озонирование на сельскохозяйственных предприятиях / Л. Н. Андреев, Е. А. Басуматорова // Сельский механизатор. – 2018. – № 12. – С. 22-23.
2. Аскосфероз пчел лечение и характерные признаки [Электронный ресурс] // Улей - все о пчелах и пчеловодстве. URL: <https://ylejbees.com/bolezni-rchel/askosferoz> (Дата обращения: 18.09.2023).
3. Ауыл шаруашылығына арналған озон генераторының құрылғысы / В. А. Мкртчян, Е. С. Цокур, А. Л. Титаревский, В. А. Туник // . – 2020. – Vol. 12, No. 4. – P. 65-67.
4. Ахмедова, О. О. Очистка сточных вод озонированием / О. О. Ахмедова // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. – 2007. – Т. 4, № 1. – С. 42-45.
5. Баракин, Н.С. 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.
6. Баскаков, И.В. Применение процесса озонирования в сельском хозяйстве / И. В. Баскаков, В. И. Оробинский, А. П. Тарасенко [и др.] // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – № 3(50). – С. 120-126.
7. Бахир, В. М. Электрохимическая активация: ключ к экологически чистым технологиям водоподготовки / В. М. Бахир // Водоснабжение и канализация. – 2012. – № 1-2. – С. 89-102.
8. Блинов, Н. В. Изыскание новых экологически безопасных средств борьбы с аскосферозом пчел: специальность 16.00.06: диссертация на соискание ученой степени кандидата ветеринарных наук / Блинов Николай Валерьевич. – Москва, 2002. – 131 с.
9. Бобкова, Г. Н. Диагностика и профилактика заразных и незаразных болезней пчел: Учебно-методическое пособие к лабораторно-

- практическим занятиям по курсу «Болезни пчел», «Болезни пчел и рыб» для студентов очной и заочной формы обучения, обучающихся по специальности 111201 – "Ветеринария" / Г. Н. Бобкова, Л. М. Луцевич, А. А. Бобков. – Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2010. – 75 с.
10. Богдан, А.В. Хранение электроактивированных растворов / А. В. Богдан, В. В. Тропин, Е. С. Цокур [и др.] // Сельский механизатор. – 2023. – № 11. – С. 26-27. – DOI 10.47336/0131-7393-2023-11-26-27.
 11. Борьба с плесенью ранней весной [Электронный ресурс] // Сообщество «Пчеловодство» в социальной сети Вконтакте. URL: https://vk.com/wall-154915831_2643 (Дата обращения: 19.01.2024).
 12. Бояринов, Г.А. Анализ результатов взаимодействия озона с хлоридом натрия в воде / Г. А. Бояринов, А. С. Гордецов, С. П. Перетягин [и др.] // Биорадикалы и антиоксиданты. – 2016. – Т. 3, № 3. – С. 10-16.
 13. Бурак, Л. Ч. Использование технологии озонирования в пищевой промышленности / Л. Ч. Бурак // Sciences of Europe. – 2022. – № 98(98). – С. 85-100.
 14. Бурак, Л. Ч. Озоновая технология как способ сохранения пищевых продуктов / Л. Ч. Бурак, А. Н. Сапач // The Scientific Heritage. – 2022. – № 86-1(86). – С. 21-33.
 15. Бутко, М. П. Обеззараживание сточных вод / М. П. Бутко, В. С. Фролов // Дезинфекция. Антисептика. – 2013. – Т. 4, № 2(14). – С. 32-45.
 16. 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; Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина. – Краснодар, 2019. – 151 с.
 17. Воробьева С. Л. Влияние витаминно-минеральной кормовой добавки на продуктивность медоносных пчел (*Apis mellifera*) / С. Л. Воробьева, Е. А. Михеева, А. В. Шишкин, М. Ю. Попкова // Вестник Ижевской

- государственной сельскохозяйственной академии. – 2023. – № 1(73). – С. 16-21.
18. Воробьева С. Л. Результаты зимовки пчелиных семей при использовании хелатных витаминно-минеральных подкормок / С. Л. Воробьева, Е. А. Михеева, А. В. Шишкин, М. Ю. Попкова // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 4(80). – С. 114-121.
19. Гафниоз пчел [Электронный ресурс] // Улей - все о пчелах и пчеловодстве. URL: <https://ylejbees.com/bolezni-pchel/245-gafnioz> (Дата обращения: 12.08.2023).
20. Горобец Д.В. Модифицированная технология получения витаминизированной натуральной пастилы синбиотического назначения: специальность 4.3.1. «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Горобец Диана Васильевна. – Краснодар, 2024. – 185 с.
21. ГОСТ 28085-2013 Средства лекарственные биологические для ветеринарного применения. Метод бактериологического контроля стерильности: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 01.07.2014 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 26 с.
22. Григорьев, М. В. Обеззараживание городских сточных вод методом озонирования / М. В. Григорьев // Эффективные технологии в области водоподготовки и очистки в системах водоснабжения и водоотведения : Материалы I Всероссийской студенческой научно-практической конференции, Волгоград, 17–19 марта 2021 года. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2021. – С. 13-16.

23. Гробов О.Ф. Болезни и вредители медоносных пчел: Справочник / О.Ф. Гробов, А.М. Смирнов, Е.Т. Попов. – М.: Агропромиздат, 1987. – 335 с: ил.
24. Дзюбо, В. В. Специфика озонирования при промышленной водоподготовке (Обзор) / В. В. Дзюбо, Л. И. Алферова // Экология промышленного производства. – 2016. – № 4(96). – С. 14-20.
25. Документация на модуль CFD программы Comsol Multiphysics. Comsol.Inc. – 1014 с.
26. Долгов, Н. Р. О применении озонирования в хранении овощей и фруктов / Н. Р. Долгов, Е. Л. Белов // Студенческая наука - первый шаг к цифровизации сельского хозяйства : материалы II Всероссийской студенческой научно-практической конференции : в 3 ч., Чебоксары, 30 сентября 2022 года / Чувашский государственный аграрный университет. Том Часть 3. – Чебоксары: Б. и., 2022. – С. 99-103.
27. Дресвянникова, Е. В. Электроаэрозольное увлажнение воздуха птицеводческих помещений / Е. В. Дресвянникова, П. Л. Лекомцев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2007. – № 10. – С. 23.
28. Европейский гнилец [Электронный ресурс] // Ветеринарная служба Владимирской области. URL: <https://vetvo.ru/evropejskij-gnilec.html> (Дата обращения: 10.08.2023).
29. Егорова Г.В. О растворимости озона в воде / Г. В. Егорова, В. А. Вобликова, Л. В. Сабитова [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. – 2015. – Т. 56, № 5. – С. 261-265.
30. Егорова, Г.В. О растворимости озона в воде / Г. В. Егорова, В. А. Вобликова, Л. В. Сабитова [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. – 2015. – Т. 56, № 5. – С. 261-265.
31. Ершов Б.Г. Кинетические закономерности разложения озона в воде / Б.Г. Ершов, П.А. Морозов, А.В. Гордеев, А.Ф. Селиверстов // Химия и технология воды. – 2009 – Т. 31. – №6. – С. 665-676.

32. Ишутин, М. С. Применение современных озонаторов в сельском хозяйстве / М. С. Ишутин, В. В. Юркин, Д. Е. Брюзгина // Актуальные проблемы энергетики АПК : Материалы XIV Национальной научно-практической конференции с международным участием, Саратов, 28 апреля 2023 года / Под общей редакцией С.М. Бакирова. – Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2023. – С. 107-110.
33. Как используются народные средства при лечении пчел [Электронный ресурс] // Информационный ресурс о пчеловодстве. URL: <https://vseopaseke.ru/pchelovojdenie/narodnye-sredstva/narodnye-sredstva-dlya-pchel/> (Дата обращения: 01.10.2023).
34. Как правильно установить персональную надбавку сотруднику [Электронный ресурс] // Клерк. URL: <https://www.klerk.ru/blogs/sbersolutions/589744/> (Дата обращения: 10.12.2024).
35. Коган В.Б. Справочник по растворимости. – Москва; Ленинград: Изд-во Акад. наук СССР, 1961. – Т1. – 961 с.
36. Кожин В. Ф. Озонирование воды / В. Ф. Кожин, д-р техн. наук, проф. И. В. Кожин, канд. техн. наук. - Москва: Стройиздат, 1974. - 160 с.
37. Кожин В.Ф. Озонирование воды. – М.: Стройиздат. – 1973. – 160 с.
38. Колибактериоз [Электронный ресурс] // Пуд меда. URL: <https://ylejbees.com/bolezni-pchel/243-kolibakterioz> (Дата обращения: 15.09.2023).
39. Колибактериоз пчел [Электронный ресурс] // Улей - все о пчелах и пчеловодстве. URL: <https://ylejbees.com/bolezni-pchel/243-kolibakterioz> (Дата обращения: 15.09.2023).
40. Колибактериоз пчел [Электронный ресурс] // ФГБУ «КРАСНОДАРСКАЯ МВЛ». URL: <https://www.kmvl23.ru/press-centr/veterinarnoe-napravlenie/694/> (Дата обращения: 14.09.2023).

41. Колосова, С. Ф. Применение электрохимически активированного водного раствора анолита при болезнях пчел / С. Ф. Колосова, Д. Е. Акимбаев, И. В. Кашкарова, Т. А. Диденко. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2017. — № 35 (169). — С. 20-22.
42. Кондратьева Н. П. Разработка установки для реализации энергосберегающей световой технологии культивирования большой восковой моли в промышленных масштабах / Н. П. Кондратьева, А. С. Осокина, В. К. Ваштиев [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. — 2021. — Т. 16, № 3(63). — С. 72-78.
43. Кондратьева, Н. П. Применение ультрафиолета для предпосевной обработкой семян / Н. П. Кондратьева, В. Ф. Сторчевой, Р. Г. Большин // Агроинженерия. — 2024. — Т. 26, № 5. — С. 59-65.
44. Конторщикова К.Н. Молекулярные продукты разложения озона в водных растворах. / К.Н. Конторщикова, Л.М. Обухова, А.А. Сибиркин // Биорадикалы и антиоксиданты. — 2015. - №1. — С. 45-53.
45. Корепанов А. С. Энергетические характеристики конвективного индукционного водонагревателя / А. С. Корепанов, П. Л. Лекомцев, М. Л. Шавкунов, Р. И. Гаврилов // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. — 2021. — № 2(66). — С. 49-56.
46. Кочиш, И. И. Применение электрохимически активированных растворов хлорида натрия для дезинфекции питьевой воды и обеззараживания стоков на птицефабрике / И. И. Кочиш, Е. Р. Нуралиев // Зоотехния. — 2013. — № 7. — С. 24-25.
47. Кудзиева, К. В. Технологии ветеринарно-санитарных мероприятий пчеловодческого предприятия / К. В. Кудзиева, И. Д. Хубулури // Вестник научных трудов молодых учёных, аспирантов, магистрантов и студентов ФГБОУ ВО "Горский государственный аграрный университет". Том 55. Часть II. — Владикавказ: Горский государственный аграрный университет, 2018. — С. 11-13.

48. Курченко, Н. Ю. Параметры и режимы электроактиватора для приготовления рабочего состава гербицидов: специальность 05.20.02 «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Курченко Николай Юрьевич, 2015. – 151 с.
49. Кучин Н.Н. Установка для шелушения рапса в электромагнитном поле сверхвысокой частоты / Н. Н. Кучин, Н. В. Цугленок, В. Ф. Сторчевой, А. В. Сторчевой // Тракторы и сельхозмашины. – 2024. – Т. 91, № 2. – С. 145-154.
50. Құрама жем өндірісінде озон генераторларын қолдану / В. А. Туник, В. А. Мкртчян, Е. С. Цокур, А. Л. Титаревский // . – 2020. – Vol. 12, No. 5. – P. 100-102.
51. Леванов, А. В. Термодинамические и кинетические параметры растворимости озона в воде / А. В. Леванов, О. Я. Исайкина, В. В. Лунин // Журнал физической химии. – 2019. – Т. 93, № 7. – С. 986-991.
52. Лекомцев, П. Л. Электроаэрозольные технологии в сельском хозяйстве: монография / П. Л. Лекомцев; П. Л. Лекомцев ; М-во сельского хоз-ва Российской Федерации, Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Ижевская гос. с.-х. акад.". – Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2006. – 219 с.
53. Лечение и обработка пчел чистотелом [Электронный ресурс] //Дом пчел. URL: <https://dompchel.ru/pchely/lechenie/chistotel/> (Дата обращения: 01.10.2023).
54. Лоза А.А. Параметры и режимы установки для групповой обработки озоном пчелиных ульев: дис. ... канд. техн. наук: 4.3.2 / Лоза Андрей Александрович; ФГБОУ ВО КГАУ им. И.Т. Трубилина; науч. рук. С.В. Оськин. — Краснодар, 2024. — 142 с.
55. Любимов А. И. Динамика силы пчелиных семей при использовании хелатных кормовых добавок / А. И. Любимов, С. Л. Воробьева, М. Ю. Попкова [и др.] // Пчеловодство. – 2024. – № 8. – С. 12-14.

56. Мал шаруашылығындағы суды тазартудың озон технологиясы / Е. С. Цокур, А. Л. Титаревский, В. А. Мкртчян, В. А. Туник // . – 2020. – Vol. 12, No. 5. – P. 45-47.
57. Меланоз [Электронный ресурс] // Ветеринарная служба Владимирской области. URL: <https://vetvo.ru/melanoz.html> (Дата обращения: 11.08.2023).
58. Морозов, Н.А. Увеличение эффективности использования электроэнергии при озонировании сточных вод / Н. А. Морозов, А. Я. Шмелев, Э. В. Наumenко [и др.] // EurasiaScience : Сборник статей LIX международной научно-практической конференции, Москва, 15 февраля 2024 года. – Москва: ООО АКТУАЛЬНОСТЬ.РФ, 2024. – С. 100-107.
59. Натуральный мёд в России подорожал почти в 2 раза [Электронный ресурс] // Информационное агентство «Накануне.RU». URL: <https://www.nakanune.ru/news/2024/09/19/22788383/> (Дата обращения: 10.12.2024).
60. Нестерова, Н. В. Использование электротехнологии озонирования на предприятиях АПК / Н. В. Нестерова, А. Н. Мануйленко // Актуальные проблемы энергетики АПК : Материалы IX международной научно-практической конференции, Саратов, 15–16 апреля 2018 года / Под общ. ред. Трушкина В.А.. – Саратов: ООО "Центр социальных агроинноваций СГАУ", 2018. – С. 159-160.
61. Николаенко С.А. Параметры системы стабилизированного электроозонирования ульев при лечении бактериозов пчел: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Николаенко Сергей Анатольевич; ФГБОУ ВО КГАУ им. И.Т. Трубилина; науч. рук. Д.А. Овсянников. — Краснодар, 2010. — 175 с.
62. Николаенко, С. А. Определение конструктивных параметров разрядного устройства системы стабилизированного озонирования ульев / С. А. Николаенко, Е. С. Цокур // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. – 2016. – № 4-2(75). – С. 178-183.

63. Нормов Д.А. Электроозонные технологии в семеноводстве и пчеловодстве: дис. ... доктора техн. наук: 05.20.02 / Нормов Дмитрий Александрович; ФГБОУ ВО КГАУ им. И.Т. Трубилина; науч. конс. И.Ф. Бородин. — Краснодар, 2009. — 340 с.
64. Обоснование параметров установки для сушки перги / С. Н. Борычев, Д. Е. Каширин, В. М. Ульянов, П. Э. Бочков // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2023. – Т. 15, № 1. – С. 115-120.
65. Овсянников Д.А. Планирование и обработка результатов эксперимента: учеб. пособие - 2-е изд., перераб. и доп. / Д.А. Овсянников Д.С. Цокур. – Краснодар: Изд-во ООО «КРОН», 2018. – 136 с.
66. Овсянников Д.А. Технология стимуляции электроозонированием весеннего развития пчелиных семей: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Овсянников Дмитрий Алексеевич; ФГБОУ ВО КГАУ им. И.Т. Трубилина; науч. рук. Д.А. Нормов. — Краснодар, 2004. — 169 с.
67. Озонирование воды. Преимущества и недостатки [Электронный ресурс] // Сайт компании ООО "РуссФильтр" URL: https://www.russfilter.ru/news/ozonation_of_water_advantages_and_disadvantages/ (Дата обращения: 15.10.2023).
68. Озонирование воды: описание технологии, применение, плюсы и минусы [Электронный ресурс] // Сайт компании ООО "ТриОзон" URL: <https://триозон.рф/озонирование-воды-описание-технологии-применение-плюсы-и-минусы> (Дата обращения: 15.10.2023).
69. Озонирование для домашнего аквариума [Электронный ресурс] // Мир аквариума URL: <https://worldaquarium.ru/ozonirovanie-dlya-domashnego-akvariuma/> (Дата обращения: 15.10.2023).
70. Озонның дәнді дақылдар сапасының көрсеткіштеріне әсері / Е. С. Цокур, А. Л. Титаревский, В. А. Мкртчян, В. А. Туник // . – 2020. – Vol. 12, No. 4. – P. 68-70.

71. Основные болезни пчел и их лечение [Электронный ресурс] // Ассоциация Пчеловодов Республики Дагестан. URL: <https://aprd05.ru/2021/09/14/osnovnye-bolezni-pchel-i-ix-lechenie/> (Дата обращения: 16.10.2023).
72. Осокина А. С. Управление развитием личинок большой восковой моли (*G. Mellonella*.) регулированием параметров микроклимата / А. С. Осокина, Н. П. Кондратьева, В. К. Ваштиев [и др.] // Вестник Чувашского государственного аграрного университета. – 2023. – № 2(25). – С. 135-143.
73. Осокина, А. С. Определение микробной чувствительности к экстрактам из личинок большой восковой моли (*Galleria mellonella* l.) и их продуктов жизнедеятельности / А. С. Осокина, И. В. Масленников // Вестник КрасГАУ. – 2021. – № 7(172). – С. 100-107.
74. Осокина, А. С. Перспектива применения природного адаптогена из личинок большой восковой моли в ветеринарии / А. С. Осокина, Е. А. Михеева, И. В. Масленников // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2023. – Т. 53, № 1. – С. 71-79.
75. Осокина, А. С. Применение планирования эксперимента при разработке питательной среды в производственном цикле культивирования личинок *G. mellonella* l / А. С. Осокина, А. В. Гущин, Э. А. Аникина // Аграрная наука. – 2022. – № 4. – С. 104-108.
76. Оськин, С. В. Необходимость применения экологически чистых способов обработки пчелинных семей от существующих болезней / С. В. Оськин, Д. А. Овсянников // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. – 2014. – № 2(18). – С. 134-144.
77. Оськин, С. В. Увеличение эффективности получения электроактивированных растворов / С. В. Оськин, Д. С. Цокур, Е. С. Цокур // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. – 2019. – № 3(39). – С. 70-72.

78. Оськин, С. В. Электротехнологии в сельском хозяйстве: учебник / С. В. Оськин; Кубанский государственный аграрный университет. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет, 2016. – 501 с.
79. Оськин, С. В. Электротехнологические направления повышения экологической безопасности сельскохозяйственной продукции / С. В. Оськин // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. – 2010. – № 1-2(4-5). – С. 107-115.
80. Оськин, С. В. Электротехнологические способы и оборудование для повышения производительности труда в медотоварном пчеловодстве Северного Кавказа / С. В. Оськин, Д. А. Овсянников. – Краснодар: ООО «Крон», 2015. – 198 с.
81. Оськин, С.В. Использование электрооборудования для активации водных растворов в АПК / С. В. Оськин, Д. С. Цокур, Е. С. Цокур // Малая энергетика: проблемы, задачи и перспективы : Материалы Международной научно-практической конференции, Краснодар, 15–16 июня 2023 года. – Краснодар: ФГБУ "Российское энергетическое агентство" Минэнерго России Краснодарский ЦНТИ- филиал ФГБУ "РЭА" Минэнерго России, 2023. – С. 100-105.
82. Оськин, С.В. Моделирование тепловых процессов в электроактиваторе / С. В. Оськин, А. П. Волошин, Е. С. Цокур [и др.] // Сельский механизатор. – 2020. – № 5-6. – С. 44-45.
83. Оськин, С.В. Совершенствование диафрагмы дискретного электроактиватора воды - экологически чистого способа получения водных растворов / С. В. Оськин, Е. С. Цокур, К. Ферейра // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. – 2017. – № 3(31). – С. 90-93.
84. Очистка воды озоном [Электронный ресурс] // Научно-производственная компания «Вагнер». URL: <https://vagner-ural.ru/vodopodgotovka-po-vidu-ochischaemyh-zagryazneniy/ochistka-vody-ozonom/> (Дата обращения: 15.10.2023).

85. Очистка воды озоном и изготовление установки своими руками [Электронный ресурс] // «Проагрегат» - каталог приборов и промышленного оборудования URL: <https://proagregat.com/nasosy/vodyanye-nasosy/ochistka-vody-ozonom/> (Дата обращения: 15.10.2023).
86. Очистка и обеззараживание воды прямым электролизом [Электронный ресурс] // Сайт ООО «Электрохимтехнологии». URL: <http://electrochlor.ru/menu.html#tab2> (Дата обращения: 10.06.2024).
87. Пат. 2156060 Российская Федерация, МПК А01К 47/00. Способ обслуживания пчел / Е.Н. Болотский, В.Н. Болотский, В.М. Бахир, Ю.Г. Задорожный; заявители и патентообладатели ООО «Лаборатория электрохимических технологий». – № 99102316/13; заявл. 04.02.1999; опубл. 20.09.2000, Бюл. №26.
88. Пат. 2430511 Российская Федерация, МПК А01К 51/00. Способ борьбы с варроатозом пчел / Д.А. Овсянников, С.А. Николаенко, А.П. Волошин, Д.С. Цокур, Д.Н. Дуданец; заявители и патентообладатели ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет». – № 2010105580/21; заявл. 16.02.2010; опубл. 10.10.2011, Бюл. №28.
89. Пат. 2494975 Российская Федерация, МПК С02F 1/461. Устройство для получения дезинфицирующего раствора /Д.А. Овсянников, А.П. Волошин, Д.С. Цокур, Д.Н. Дуданец, Л.В. Потапенко; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина. – № 2012110433/05; заявл. 19.03.2012; опубл. 10.10.2013, Бюл. №28.
90. Пат. № 2688183 С1 Российская Федерация, МПК С25В 9/08, С25В 1/10. Устройство для электролиза водных растворов: № 2018112058: заявл. 03.04.2018: опубл. 21.05.2019 / Н. И. Богатырев, С. В. Оськин, Н. Ю. Курченко [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина".

91. Пат. № 2700526 С1 Российская Федерация, МПК С02F 1/461, А61L 2/03, С25В 9/08. Устройство для получения дезинфицирующих растворов на пасеке: № 2019103162: заявл. 05.02.2019: опубл. 17.09.2019 / С. В. Оськин, Д. А. Овсянников, С. А. Николаенко [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина".
92. Пат. № 2710569 С1 Российская Федерация, МПК С02F 1/461, С25В 15/02, С25В 11/03. Электроактиватор воды: № 2019120486: заявл. 28.06.2019: опубл. 27.12.2019 / С. В. Оськин, С. А. Николаенко, Д. С. Цокур [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина".
93. Пат. № 2728635 С1 Российская Федерация, МПК А01К 53/00. Автоматизированная система кормления пчел на пасеке в осенне-весенний период: № 2019131016: заявл. 30.09.2019: опубл. 30.07.2020 / С. А. Николаенко, Д. С. Цокур, Е. С. Цокур [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина".
94. Пат. № 2802694 С1 Российская Федерация, МПК С02F 1/461. Проточный диафрагменный электролизер воды: № 2022129205: заявл. 08.11.2022: опубл. 30.08.2023 / С. В. Оськин, А. С. Оськин, Д. А. Овсянников [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина".
95. Пат. № 2825153 С1 Российская Федерация, МПК А01К 51/00, А01К 55/00. Способ озонирования группы пчелиных ульев: № 2024106364: заявл. 07.03.2024: опубл. 21.08.2024 / С. В. Оськин, А. А. Лоза, Д. С. Цокур [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина".

96. Пат. на полезную модель № 218329 U1 Российская Федерация, МПК C02F 1/461, C25B 9/17. Проточный бездиафрагменный электролизер воды: № 2022129907: заявл. 17.11.2022: опубл. 22.05.2023 / С. В. Оськин, А. С. Оськин, Д. А. Овсянников [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина".
97. Перевод концентрации газов [Электронный ресурс] // Инженерный справочник. URL: <https://dpva.ru/Guide/GuideChemistry/Concentration/GasesConcentration/> (Дата обращения: 22.06.2024).
98. Першин, А. Ф. Влияние времени обработки и температуры на качество сухих комбикормовых смесей озоном / А. Ф. Першин, А. А. Смирнов // Труды международной научно-технической конференции Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. – 2014. – Т. 3. – С. 34-37.
99. Получение озона [Электронный ресурс] // Системы очистки и обеззараживания воды озоном. URL: <https://waterline.ru/poluchenie-ozona> (Дата обращения: 16.10.2023).
100. Пospelов, А. В. влияние температуры воды на растворимость озона / А. В. Пospelов // Передовые технологии и материалы будущего: Сборник статей IV Международной научно-технической конференции. В 3-х томах, Минск, 09 декабря 2021 года. Том 2. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2021. – С. 140-143.
101. Пospelова И. Г. Термическое обеззараживание почвосмеси ИК-излучением / И. Г. Пospelова, П. В. Дородов, Е. А. Михеева [и др.] // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2024. – Т. 71, № 4(57). – С. 3-8.

102. Применение озонаторов в пчеловодстве в период весеннего наращивания пчелиных семей [Электронный ресурс] // Улей – все о пчелах и пчеловодстве URL: <https://ylejbees.com/bolezni-pchel/2185-primenenie-ozonatorov> (Дата обращения: 15.10.2023).
103. Применение озонирования в пчеловодстве [Электронный ресурс] // сайт компании НП ООО «ИНИТОР». URL: <http://initor.by/primenenie-ozonirovaniya-v-pchelovodstve> (Дата обращения: 15.10.2023).
104. Промышленные озонаторы воды [Электронный ресурс] // Сайт компании ООО "ОЗОН ПРОМ-ТЕХ" URL: <http://ozonpromtech.ru/info/articles/promyshlennye-ozonatory-vody/> (Дата обращения: 15.10.2023).
105. Распад озона в воде [Электронный ресурс] // ЭКОНАУ. URL: <https://ekonow.ru/tehnologii/ozonirovanie/voda/raspad/> (Дата обращения: 10.08.2023).
106. Расчет инвестиционных проектов [Электронный ресурс] // В. Прохоров - Экономические расчеты в Excel: Финансовый анализ, расчет финансовых показателей, финансовая математика, расчет инвестиций, расчет себестоимости. URL: <https://www.finances-analysis.ru/buy-xls-invest.htm> (Дата обращения: 10.12.2024).
107. Романовский, В.И. Технические аспекты использования озона в водоподготовке / В. И. Романовский, А. Д. Гуринович, Ю. Н. Бессонова, Е. В. Крышилович // Вода Magazine. – 2016. – № 2(102). – С. 36-41.
108. Сердюченко, И. В. Влияние озона на микрофлору кишечного тракта медоносных пчел карпатской породы / И. В. Сердюченко // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 1. – С. 94-96.
109. Скворцов, В. М. Использование озона в животноводстве / В. М. Скворцов, Д. С. Толстой, Е. А. Денисенко // Вестник современных исследований. – 2018. – № 12.5(27). – С. 258-259.

110. Смирнов, А. А. Исследование влияния озона и свч-излучения на процесс сушки и показатели качества зерна пшеницы / А. А. Смирнов, Ю. А. Прошкин // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2019. – № 4(37). – С. 19-24.
111. Смирнова, С. Д. Пчеловодство - дело всей жизни / С. Д. Смирнова, А. С. Осокина // Пчеловодство. – 2024. – № 4. – С. 23-25.
112. Сорные растения как объект электрической прополки: биологические особенности и электрофизические свойства / И. В. Юдаев, В. И. Баев, Т. П. Бренина, Д. С. Елисеев; Волгоградская государственная сельскохозяйственная академия. – Волгоград: Волгоградская государственная сельскохозяйственная академия, 2004. – 164 с.
113. Стародубцева Г.П. Предпосевная обработка лука импульсным электрополем / Г. П. Стародубцева, С. И. Любая, В. И. Хайновский [и др.] // Сельский механизатор. – 2018. – № 4. – С. 32-33.
114. Стародубцева, Г. П. Обоснование параметров воздействия импульсного электрического поля при предпосевной обработке семян озимой пшеницы / Г. П. Стародубцева, С. А. Ливинский, С. И. Любая // Вестник АПК Ставрополя. – 2017. – № 2(26). – С. 44-48.
115. Степанова, Д. А. Методы борьбы с микозами у пчел / Д. А. Степанова, Е. А. Макарова, А. М. Коновалов // Актуальные вопросы зоологии, экологии и охраны природы / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии - МВА имени К.И. Скрябина»; Евроазиатская региональная ассоциация зоопарков и аквариумов; Союз зоопарков и аквариумов России; Московский государственный зоологический парк. Том Выпуск 5. – Москва: ЗооВетКнига, 2023. – С. 169-172.
116. Степанчук, Г. В. Комбинированная предпосевная обработка семян как способ их обеззараживания / Г. В. Степанчук, Н. А. Протасова // Агротехника и энергообеспечение. – 2023. – № 4(41). – С. 122-127.

117. Сторчевой В.Ф. Эффективность применения способа озонирования дезинфицирующего раствора для стимуляции и роста растений с учетом конструктивных особенностей системы озонирования / В. Ф. Сторчевой, Д. А. Гуров, Н. Е. Кабдин [и др.] // Реинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робототехнических комплексов : Сборник статей Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (г. Москва, 19-20 декабря 2023 г.), посвященной 100-летию со дня рождения ветерана Великой Отечественной Войны, заслуженного деятеля науки и техники, заслуженного изобретателя РФ, д.т.н., профессора Николая Федоровича Тельнова, Москва, 19–20 декабря 2023 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, 2024. – С. 91-98.
118. Страодубцева Г.В. Аппарат для магнитной обработки воды, используемый в хлебопечении / Г. П. Стародубцева, С. И. Любая, Е. И. Рубцова [и др.] // Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе : Материалы XIII Международной научно-практической конференции , Ставрополь, 24–25 мая 2019 года. – Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, 2019. – С. 38-44.
119. Страхов В.Ю. Выбор источника для УФ-облучения зерна на установке ленточного типа / В. Ю. Страхов, В. Ф. Сторчевой, Ю. В. Саенко, Н. Е. Кабдин // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 59-67.
120. СТЭЛ [Электронный ресурс] // Электрохимические системы и технологии Витольда Бахира. URL: <https://bakhir.ru/fotogalereja/stjel> (Дата обращения: 01.06.2024).
121. Таранов М.А. Методика расчета производительности компрессорного генератора озона / М. А. Таранов, П. В. Гуляев, Г. В. Степанчук [и др.] // АгроЭкоИнфо. – 2022. – № 5(53).

122. Тарифы на электрическую энергию для населения в 2024 году [Электронный ресурс] // Р4Energy. URL: <https://p4energy.ru/2024/04/ee2024/> (Дата обращения: 10.12.2024).
123. Теоретическое обоснование инфракрасной энергосберегающей сушки продуктов пчеловодства / С. Н. Борычев, Д. Е. Каширин, К. Е. Гобелев [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2022. – Т. 14, № 2. – С. 141-148.
124. Технологии по применению электроактивированных растворов (ЭАР) [Электронный ресурс] // НИЦ "ИКАР" URL: <https://www.ikar.udm.ru/sb/sb34-3.htm> (Дата обращения: 15.10.2023).
125. Трушкин, В. А. Перспективы использования озона в сельскохозяйственном производстве / В. А. Трушкин, С. В. Шлюпиков, Т. И. Третьякова // Актуальные проблемы энергетики АПК : Материалы X национальной научно-практической конференции с международным участием, Саратов, 22 апреля 2019 года / Под общ. ред. Трушкина В.А. – Саратов: ООО "Центр социальных агроинноваций СГАУ", 2019. – С. 228-232.
126. Урожайность мёда и факторы, влияющие на нее [Электронный ресурс] // БИО корова Агро Вестник. URL: <https://biokorova.ru/urozhajnost-myoda-i-factory-vliayushhie-na-nee/> (Дата обращения: 10.08.2023).
127. Федорченко, В.А. Использование электроактиватора воды в птицеводстве / В. А. Федорченко, Е. С. Цокур // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сборник статей по материалам 71-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2015 год, Краснодар, 12 апреля 2016 года / Министерство сельского хозяйства РФ; ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет, 2016. – С. 690-693.
128. Цокур, Д. С. Улучшение качества регулирования кислотности почвы на основе электроактиватора воды при выращивании томатов в условиях

- закрытого грунта : специальность 05.20.02 «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Цокур Дмитрий Сергеевич. – Краснодар, 2013. – 126 с.
129. Цокур, Е. С. Применение процесса озонирования в сельском хозяйстве / Е. С. Цокур // *Colloquium-Journal*. – 2019. – № 25-1(49). – С. 63-64.
130. Цокур, Е. С. Применение электроактивированной воды в животноводстве / Е. С. Цокур, Д. С. Чижов // *Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность*. – 2017. – № 3(31). – С. 130-132.
131. Цокур, Е. С. Применение электроактивированной воды в пчеловодстве / Е. С. Цокур, В. И. Барабаш // *Colloquium-Journal*. – 2020. – № 20-1(72). – С. 29-30. – DOI 10.24411/2520-6990-2020-12075.
132. Цокур, Е. С. Совершенствование технологии получения дезинфицирующих растворов на пасеке / Е. С. Цокур // *Современные векторы развития науки: Сборник статей по материалам ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2023 год, Краснодар, 06 февраля 2024 года*. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2024. – С. 725-726.
133. Цокур, Е.С. Применение электроактивированного раствора в птицеводстве / Е. С. Цокур, Д. С. Цокур // *Научное обеспечение агропромышленного комплекса : Сборник статей по материалам 75-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2019 год, Краснодар, 02–16 марта 2020 года / Отв. за выпуск А.Г. Кощаев*. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2020. – С. 955-956.
134. Цокур, Е.С. Электроактиватор для АПК / Е. С. Цокур // *Точки научного роста: на старте десятилетия науки и технологии : Материалы ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за*

- 2022 г., Краснодар, 12 мая 2023 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2023. – С. 858-859.
135. Чем формальдегид опасен для здоровья человека [Электронный ресурс] // Испытательная лаборатория «Веста». URL: <https://testslab.ru/stati/chem-formaldegid-opasen-dlya-zdorovya-cheloveka/> (Дата обращения: 18.09.2023).
 136. Чухрай, Е.В. Разработка проточного водонагревателя воды для поения пчёл зимой / Е. В. Чухрай, Е. С. Цокур // Проблемы и перспективы в международном трансфере инновационных технологий : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Пермь, 12 февраля 2018 года. – Пермь: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2018. – С. 232.
 137. Шабалина, А.В. Исследование изменения pH воды при озонировании / А. В. Шабалина, Е. Д. Фахрутдинова, М. И. Федотова [и др.] // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 375. – С. 200-203.
 138. Ширяева, Е. С. Инфекционные болезни медоносных пчел / Е. С. Ширяева, Г. Р. Мазитова // Проблемы научной мысли. – 2018. – Т. 12, № 7. – С. 060-062.
 139. Шихалева, Е. П. Применение озонирования в технологии очистки сточных вод / Е. П. Шихалева // Сантехника. – 2019. – № 6. – С. 40-47.
 140. Andrzej K. Bin Ozone transfer from gas into water and contact equipment design. Ozone science and technology. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). – 20 p.
 141. FAQ по расчету U-критерия Манна-Уитни [Электронный ресурс] // PSYCHOL-OK. URL: <https://www.psychol-ok.ru/psyforum/index.php?showtopic=375> (Дата обращения: 09.12.2024).
 142. Kuosa, M. Modeling reaction kinetics and mass transfer in ozonation in water solutions. Lappeenranta, 2008. – 124 p.

143. Kuosa, M., Laari, A., & Kallas, J. (2004). Determination of the Henry's Coefficient and Mass Transfer for Ozone in a Bubble Column at Different pH Values of Water. *Ozone: Science & Engineering*, 26(3), 277–286.
144. Oskin S. Simulation of thermal processes in greenhouse / S. Oskin, D. Tsokur, A. Voloshin [et al.] // *Engineering for Rural Development: 20, Virtual, Jelgava, 26–28 мая 2021 года. – Virtual, Jelgava, 2021. – P. 1715-1721.*
145. Oskin, S. V. Improving the Efficiency of a Non-flowing Diaphragm Electrolyzer / S. V. Oskin // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. – 2021. – Vol. 729 LNEE. – P. 143-151. – DOI 10.1007/978-3-030-71119-1_15.
146. R.H.S. Jansen Ozonation of Humic Substances in a Membrane Contactor Mass Transfer, Product Characterization and Biodegradability Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands. – 2005. – 224 p.
147. Rodríguez A. Ozone-Based Technologies in Water and Wastewater Treatment / A. Rodríguez, Rosal R., Perdígón-Melón J. A. [etc.] // *Hdb Env Chem Vol. 5, Part S/2 (2008): 127–175.*
148. Rodríguez, A., Rosal, R., Perdígón-Melón, J. A., Mezcua, M., Agüera, A., Hernando, M. D., ... García-Calvo, E. (n.d.). Ozone-Based Technologies in Water and Wastewater Treatment. *Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste*, 127–175.
149. Roustan, M., Mallevialle, J., Roques, H., & Jones, J. P. (1980). Mass Transfer of Ozone to Water: A Fundamental Study. *Ozone: Science & Engineering*, 2(4), 337–344.
150. Zhou, H., Smith, D. W., & Stanley, S. J. (1994). Modeling of Dissolved Ozone Concentration Profiles in Bubble Columns. *Journal of Environmental Engineering*, 120(4), 821–840.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Результаты исследования изменения проводимости воды
в зависимости от ее pH

Таблица П1.1 – Изменение проводимости анолита σ_A во время электролиза при разной начальной проводимости σ_0 исходной воды с pH = 8,3

№	$\sigma_0 = 1000$ мкСм/см		$\sigma_0 = 1500$ мкСм/см		$\sigma_0 = 2000$ мкСм/см	
	σ_A , мкСм/см	pH	σ_A , мкСм/см	pH	σ_A , мкСм/см	pH
1	850	6,34	1333	6,24	1850	6,3
2	670	5,6	1184	5,25	1720	5,28
3	1050	3	1530	2,92	2040	2,93
4	1250	2,7	1806	2,65	2330	2,64
5	1540	2,62	2100	2,53	2640	2,48

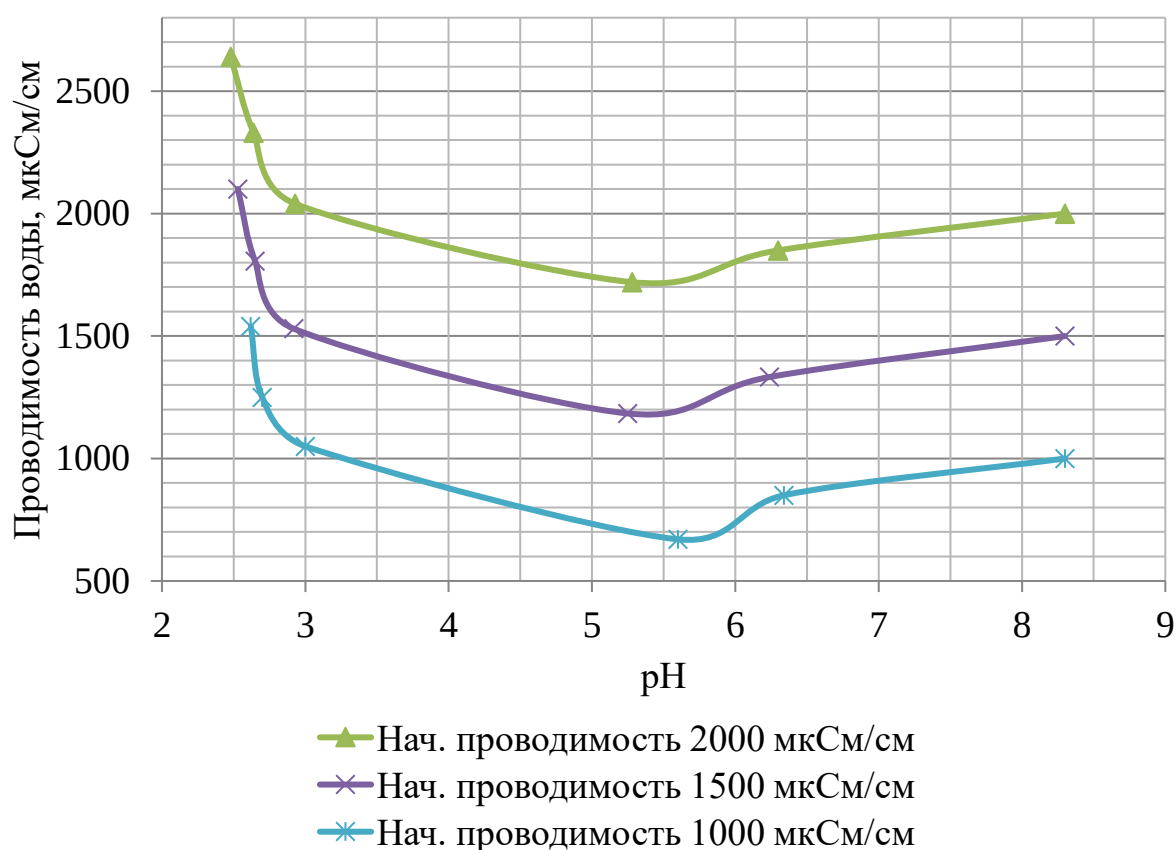


Рисунок П1.1 – Графики изменения проводимости анолита σ_A во время электролиза при разной начальной проводимости σ_0 исходной воды с pH = 8,3

Результаты компьютерного моделирования падения напряжения U на электролизере и его элементах при разных значениях тока I и расходе воды Q через него

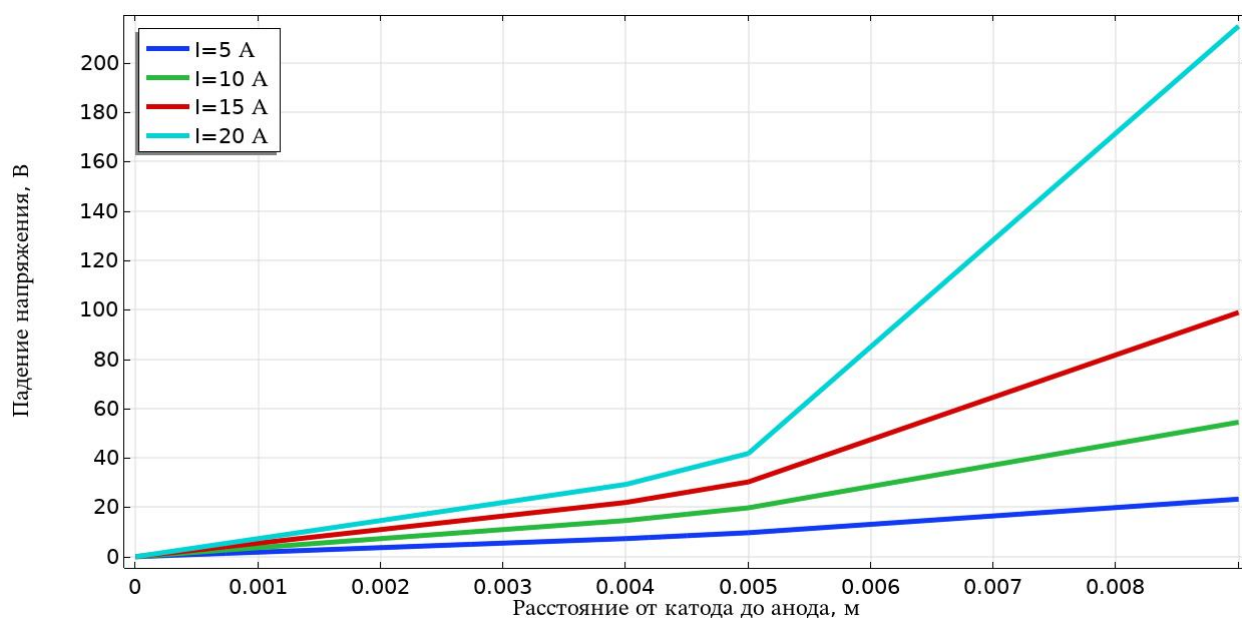


Рисунок П2.1 – Графики падения напряжения между катодом и анодом в зависимости от тока через электролизер при $Q = 1,5$ л/мин

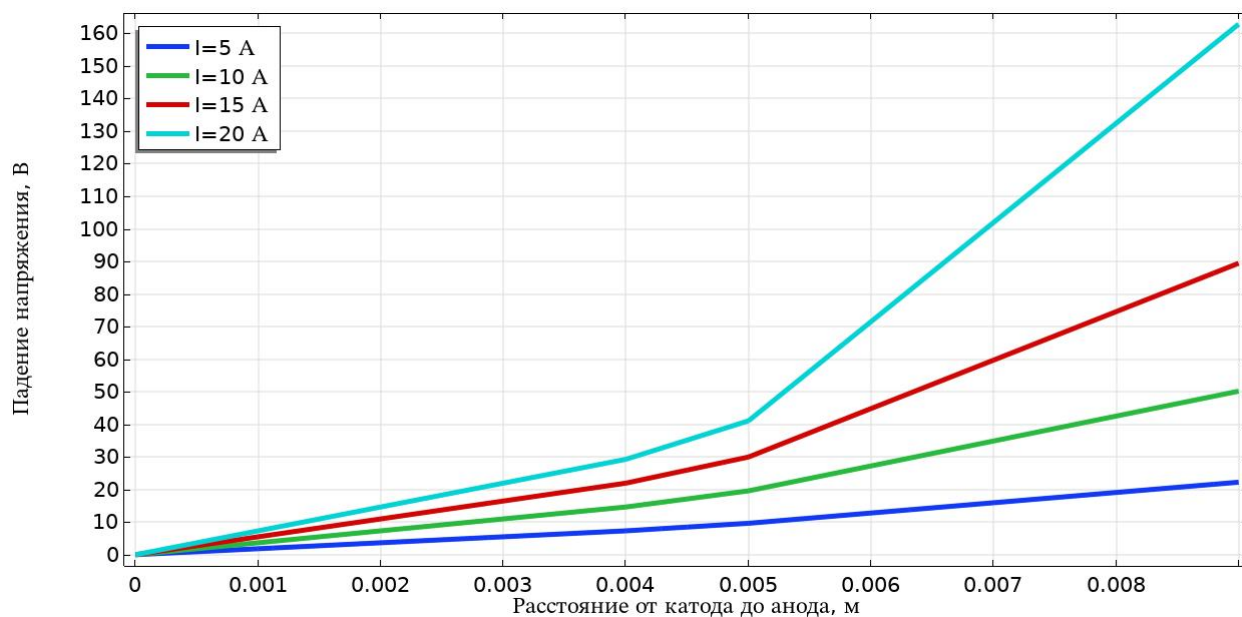


Рисунок П2.2 – Графики падения напряжения между катодом и анодом в зависимости от тока через электролизер при $Q = 2$ л/мин

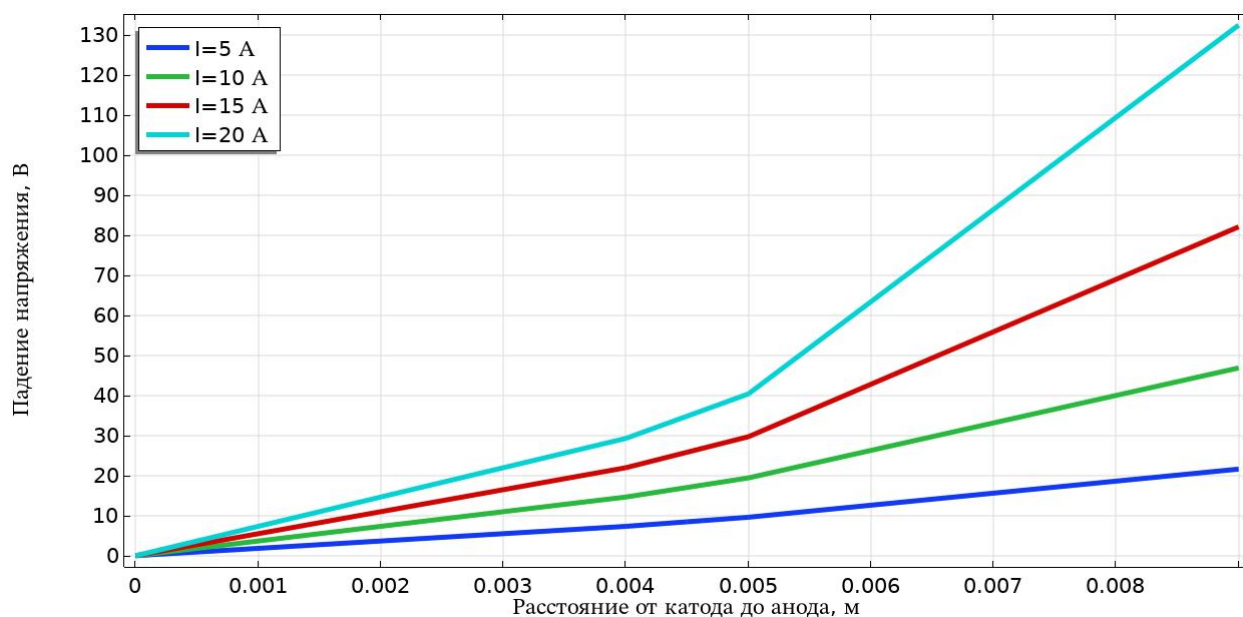


Рисунок П2.3 – Графики падения напряжения между катодом и анодом в зависимости от тока через электролизер при $Q = 2,5$ л/мин

Примечание. На рис. П2.1-П2.3 по оси x от 0 м до 0,004 м – это расстояние, соответствующее толщине катодной камеры; от 0,004 м до 0,005 – толщине диафрагмы; от 0,005 м до 0,009 м – толщине анодной камеры.

Таблица П2.1 – Значения падений напряжений на катодной камере, диафрагме и анодной камере в зависимости от подаваемого на электроактиватор тока при $Q = 1,5$ л/мин

Токи, А →	Падение напряжения на катодной камере, В				Падение напряжения на диафрагме, В				Падение напряжения на анодной камере, В			
	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
	7,3	14,6	22	29,2	2,4	5,2	8,2	12,6	13,6	34,7	68,8	173,2

Таблица П2.2 – Значения падений напряжений на катодной камере, диафрагме и анодной камере в зависимости от подаваемого на электроактиватор тока при $Q = 2$ л/мин

	Падение напряжения на катодной камере, В				Падение напряжения на диафрагме, В				Падение напряжения на анодной камере, В			
Токи, А →	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
	7,3	14,6	22	29,2	2,3	5	8	11,8	12,6	30,6	59,5	121,8

Таблица П2.3 – Значения падений напряжений на катодной камере, диафрагме и анодной камере в зависимости от подаваемого на электроактиватор тока при $Q = 2,5$ л/мин

	Падение напряжения на катодной камере, В				Падение напряжения на диафрагме, В				Падение напряжения на анодной камере, В			
Токи, А →	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
	7,3	14,6	22	29,2	2,2	4,8	7,7	11,2	12	27,5	52,3	92

Результаты расчета U-критерия по методике, описанной в [141]

Таблица ПЗ.1 – Результаты расчета U-критерия при сравнении теоретических и экспериментальных данных температуры анолита при $Q = 1,5$ л/мин

№	Выборка 1	Ранг 1	Выборка 2	Ранг 2
1	21.7	1	22.5	2
2	26.7	4	26.3	3
3	35	6	34	5
4	46.6	8	43.5	7
Суммы:		19		17

$$U_{\text{эмп}} = 7$$

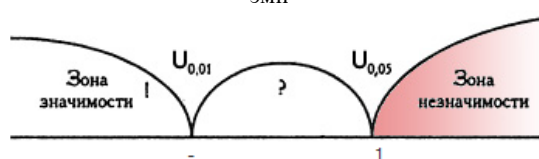


Рисунок ПЗ.1 – Изображение оси значимости при сравнении теоретических и экспериментальных данных температуры анолита при $Q = 1,5$ л/мин

Полученное эмпирическое значение $U_{\text{эмп}}(7)$ находится в зоне незначимости, что говорит о том, что между теоретическими и экспериментальными данными нет никаких статистических различий.

Таблица ПЗ.2 – Результаты расчета U-критерия при сравнении теоретических и экспериментальных данных температуры анолита при $Q = 2$ л/мин

№	Выборка 1	Ранг 1	Выборка 2	Ранг 2
1	21.3	1	22.2	2
2	25.1	3	25.9	4
3	31.4	5	33	6
4	40.2	8	39	7
Суммы:		17		19

$$U_{\text{эмп}} = 7$$

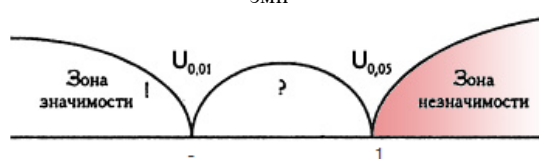


Рисунок ПЗ.2 – Изображение оси значимости при сравнении теоретических и экспериментальных данных температуры анолита при $Q = 2$ л/мин

Полученное эмпирическое значение $U_{\text{эмп}}(7)$ находится в зоне незначимости, что говорит о том, что между теоретическими и экспериментальными данными нет никаких статистических различий.

Таблица ПЗ.3 – Результаты расчета U-критерия при сравнении теоретических и экспериментальных данных температуры анолита при $Q = 2,5$ л/мин

№	Выборка 1	Ранг 1	Выборка 2	Ранг 2
1	21	1	21.5	2
2	24.1	3	24.9	4
3	29.2	5	30.5	6
4	36.4	7	37.5	8
Суммы:		16		20

$$U_{\text{эмп}} = 6$$

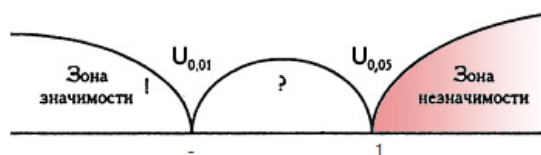


Рисунок ПЗ.3 – Изображение оси значимости при сравнении теоретических и экспериментальных данных температуры анолита при $Q = 2,5$ л/мин

Полученное эмпирическое значение $U_{\text{эмп}}(6)$ находится в зоне незначимости, что говорит о том, что между теоретическими и экспериментальными данными нет никаких статистических различий.

Таблица ПЗ.4 – Результаты расчета U-критерия при сравнении теоретических и экспериментальных напряжений между электродами установки при $Q = 1,5$ л/мин

№	Выборка 1	Ранг 1	Выборка 2	Ранг 2
1	23.3	1	24	2
2	54.5	3	70	4
3	98.9	5	105	6
4	215	8	201	7
Суммы:		17		19

$$U_{\text{эмп}} = 7$$

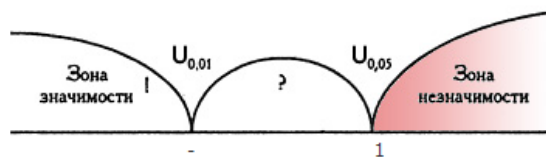


Рисунок ПЗ.4 – Изображение оси значимости при сравнении теоретических и экспериментальных напряжений между электродами установки при $Q = 1,5$ л/мин

Полученное эмпирическое значение $U_{\text{эмп}}(7)$ находится в зоне незначимости, что говорит о том, что между теоретическими и экспериментальными данными нет никаких статистических различий.

Таблица ПЗ.5 – Результаты расчета U-критерия при сравнении теоретических и экспериментальных напряжений между электродами установки при $Q = 2$ л/мин

№	Выборка 1	Ранг 1	Выборка 2	Ранг 2
1	22.2	1	25	2
2	50.2	3	68	4
3	89.5	5	98	6
4	163	8	151	7
Суммы:		17		19

$$U_{\text{эмп}} = 7$$

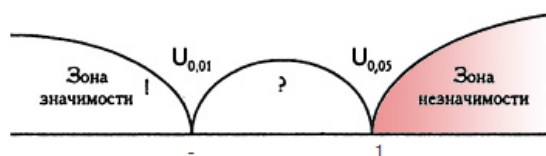


Рисунок ПЗ.5 – Изображение оси значимости при сравнении теоретических и экспериментальных напряжений между электродами установки при $Q = 2$ л/мин

Полученное эмпирическое значение $U_{\text{эмп}}(7)$ находится в зоне незначимости, что говорит о том, что между теоретическими и экспериментальными данными с 95% вероятностью нет никаких статистических различий.

Таблица ПЗ.6 – Результаты расчета U-критерия при сравнении теоретических и экспериментальных напряжений между электродами установки при $Q = 2,5$ л/мин

№	Выборка 1	Ранг 1	Выборка 2	Ранг 2
1	21.6	1	27	2
2	46.9	3	65	4
3	82.1	5	94	6
4	132	8	127	7
Суммы:		17		19

$$U_{\text{эмп}} = 7$$

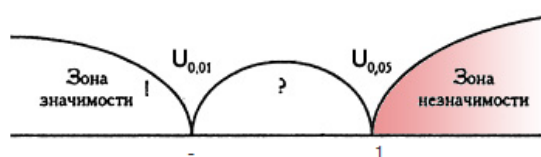


Рисунок ПЗ.6 – Изображение оси значимости при сравнении теоретических и экспериментальных напряжений между электродами установки при $Q = 2,5$ л/мин

Полученное эмпирическое значение $U_{\text{эмп}}(7)$ находится в зоне незначимости, что говорит о том, что между теоретическими и экспериментальными данными с 95% вероятностью нет никаких статистических различий.

Результаты расчета экономической эффективности от внедрения проточного электроактиватора для профилактических обработок ульев

Таблица П4.1 – Результаты по 1-му варианту

Денежный поток на шаге						Нарастающим итогом		
Год	Расход	Доход	Потребность в инвестициях	Чистый доход	Дисконтированный ЧД	Потребность в инвестициях	Чистый доход	Дисконтированный ЧД
1	180 000,00	75 000,00	180 000,00	-105 000,00	-105 000,00	180 000,00	-105 000,00	-105 000,00
2	10 065,00	87 500,00	-64 935,00	77 435,00	66 754,31	115 065,00	-27 565,00	-38 245,69
3	10 065,00	123 750,00	-77 435,00	113 685,00	84 486,47	37 630,00	86 120,00	46 240,78
4	10 065,00	100 000,00	-113 685,00	89 935,00	57 617,55	-76 055,00	176 055,00	103 858,33
5	10 065,00	187 500,00	-89 935,00	177 435,00	97 995,77	-165 990,00	353 490,00	201 854,10
	220 260,00	573 750,00		353 490,00				201 854,10

Таблица П4.2 – Результаты по 2-му варианту

Денежный поток на шаге						Нарастающим итогом		
Год	Расход	Доход	Потребность в инвестициях	Чистый доход	Дисконтированный ЧД	Потребность в инвестициях	Чистый доход	Дисконтированный ЧД
1	180 000,00	108 000,00	180 000,00	-72 000,00	-72 000,00	180 000,00	-72 000,00	-72 000,00
2	10 065,00	93 750,00	-97 935,00	83 685,00	72 142,24	82 065,00	11 685,00	142,24
3	10 065,00	136 125,00	-83 685,00	126 060,00	93 683,12	-1 620,00	137 745,00	93 825,36
4	10 065,00	78 750,00	-126 060,00	68 685,00	44 003,57	-127 680,00	206 430,00	137 828,93
5	10 065,00	175 500,00	-68 685,00	165 435,00	91 368,28	-196 365,00	371 865,00	229 197,21
	220 260,00	592 125,00		371 865,00				229 197,21

УТВЕРЖДАЮ:
 ООО «Предприятие по пчеловодству
 «Краснодарское»
 ИНН 2310010997
 350002, Краснодарский край,
 г. Краснодар, ул. Садовая, 50
 Директор организации
 Карцев В.И.



АКТ
о внедрении результатов научной работы
Цокур Екатерины Сергеевны

Комиссия в составе: заведующего кафедрой «Электрические машины и электропривод» ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, д.т.н., профессора Оськина С.В., к.т.н. Николаенко С.А., ассистента Цокур Е.С. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Параметры и режимы работы проточного электроактиватора водных растворов с озонированием для профилактической обработки ульев», представленной в виде макетного образца электроактиватора переданы предприятию на предмет производственной проверки и для дальнейшего использования в его работе. Электроактиватор водных растворов был изготовлен в Кубанском ГАУ и использован на пасеке в 50 ульев. В результате испытаний установлено, что внедрение разработанного электроактиватора позволило:

- сократить заболеваемость пчел в опытных ульях в 2 раза, что в свою очередь позволило сократить во столько же количество используемых антибиотиков и повысить качество меда;
- визуально снизить заклешенность пчел;
- повысить медопроизводство опытных по сравнению с контрольными ульев на 12 %.

Председатели комиссии:
 зав. кафедрой «Электрические
 машины и электропривод»,
 д.т.н., профессор
 Члены комиссии:
 к.т.н., доцент
 ассистент

Оськин С.В.

Николаенко С.А.
 Цокур Е.С.

10.09.2024

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор ФГБОУ ВО

Кубанский ГАУ, профессор

27.02.25 С.М. Резниченко



АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы
Цокур Екатерины Сергеевны в учебном процессе ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ на
факультете энергетики

Комиссия в составе:

Председателя – декана факультета энергетики, к.т.н., доцента А.А. Шевченко; членов комиссии: заведующего кафедрой «Электрические машины и электропривод», д.т.н., профессора С.В. Оськина; профессора кафедры «Электрические машины и электропривод», д.т.н., доцента Д.А. Овсянникова составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Параметры и режимы работы проточного электроактиватора водных растворов с озонированием для профилактической обработки ульев», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в учебном процессе на факультете энергетики.

Комиссия установила, что материалы диссертационной работы Цокур Екатерины Сергеевны использованы при изучении дисциплины «Основы электротехнологии» и «Методика экспериментальных исследований» на кафедре электрических машин и электропривода.

Комиссия считает, что материалы диссертации, включенные в рассматриваемую дисциплину, повышают степени освоения профессиональных компетенций обучающимися по направлениям подготовки 35.03.06 и 35.04.06.

Председатель комиссии: Шевченко А.А. Шевченко

Члены комиссии: Оськин С.В. Оськин

Овсянников Д.А. Овсянников