

*На правах рукописи*



**Коржаков Алексей Валерьевич**

**РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ АКУСТО-МАГНИТНОЙ  
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ СНИЖЕНИЯ СОЛЕОТЛОЖЕНИЙ  
В ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ГИДРОПОННЫХ УСТАНОВКАХ  
ЗАЩИЩЕННОГО ГРУНТА**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии  
и электрооборудование в сельском хозяйстве

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

**Краснодар – 2020**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени академика И. Т. Трубилина»

Научный

**Оськин Сергей Владимирович**

консультант:

доктор технических наук, профессор

Официальные

оппоненты:

**Шерязов Сакен Койшыбаевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов» ФГОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет

**Кондратьева Надежда Петровна**

доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Автоматизированный электропривод» ФГБОУ ВО «Ижевская государственная сельскохозяйственная академия»

**Загинайлов Владимир Ильич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения и электротехники имени академика И.А. Будзко, институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

Ведущая

организация

ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет».

Защита состоится " 24 " марта 2021 г. в 10<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 220.038.08 при ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина,13, корпус факультета механизации, ауд. № 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ [www.kubsau.ru](http://www.kubsau.ru). Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г., размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ <http://vak2.ed.gov.ru/> и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>.

Ученый секретарь диссертационного совета доктор технических наук, профессор Фролов Владимир Юрьевич



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В последние годы во всем мире не ослабевает интерес к гидропонике. Россия располагает не только большими запасами органического топлива, но и геотермальными ресурсами, энергия которых на порядок превышает весь потенциал органического топлива. На территории России разведано 66 геотермальных месторождений с производительностью более 240 тыс. м<sup>3</sup>/сут. термальных вод и более 105 тыс. т/сут. парогидротерм. Пробурено свыше 4000 скважин для использования геотермальных ресурсов. В Краснодарском крае и Адыгее разведано 18 месторождений геотермальных вод, в том числе 14 эксплуатируемых, 5 простаивающих без потребителей. Тепловой потенциал разведанных геотермальных месторождений Краснодарского края и Республики Адыгея превышает 3800 ГДж в год, что составляет более 71% от количества тепловой энергии, выработанной Кубаньэнерго в 2000 г. В системах теплоснабжения используется менее 5% этого потенциала. Чтобы обеспечить высокую эффективность термальных источников, необходимо максимально использовать тепловой потенциал при комплексном использовании этих вод.

Если в пластовых условиях термальная углекислая вода насыщена карбонатом кальция, то при выходе на поверхность и постепенном снижении давления происходит дегазация углекислоты из термального раствора и многократное его пресыщение по кальциту. В процессе теплоснабжения гидропонных теплиц возникают солеотложения, ухудшаются теплотехнические характеристики отопительных приборов, возрастают гидравлические сопротивления трубопроводов, возможна их полная закупорка и выход системы из строя. Применяемые реагентные методы не позволяют предотвращать накипеобразование, а работают только по факту образования накипи.

Для устранения указанных недостатков необходимо создать технологию, которая при низких эксплуатационных затратах имеет высокие показатели устранения накипи на стенках теплотехнического оборудования. В основе такой технологии лежит одновременное использование электромагнитных и акустических полей высо-

кой частоты. Разработка новой электротехнологии невозможна без создания новой теории исследования и конструирования. Эффективность акустической энергии проявляется в предотвращении формирования первичных кристаллов на трубах. Магнитная обработка приводит к укрупнению ферромагнитных примесей в воде и адсорбированию карбонатных кристаллов, в результате чего образование твердой фазы  $\text{CaCO}_3$  происходит в толще воды, а не на поверхности труб.

Исследования выполнялись в соответствии с планом НИР Кубанского ГАУ №ГР АААА-А16-116021110071-1 (2016-2020 гг.).

**Степень разработанности темы исследования.** Современные агротехнологии выращивания овощей в теплице позволяют посредством электротехнологий получить заданное качество и приемлемую себестоимость продукции. Так работы Кондратьевой Н.П. и ее учеников направлены на внедрение электротехнологий в тепличных комплексах. Важной составной частью себестоимости тепличной продукции являются энергетические ресурсы – вопросам их снижения посвящены исследования Загинайлова В.И.

Использование геотермальных источников привлекательно, но по причине интенсивного накипеобразования в системе теплоснабжения оказывается экономически нецелесообразным. Глубокие исследования возобновляемых источников энергии, в том числе низкопотенциального тепла, проводит Шерьязов С.К.

Несмотря на большое количество работ, направленных на повышение эффективности системы теплоснабжения аграрных комплексов, проблема накипеобразования остаётся актуальной. Объяснения противонакипного эффекта предлагали многие ученые: С.И. Ремпель, Н.П. Лапотышкин, А.Н. Киргинцев, В.М. Соколов, А.И. Шахов, С.С. Душкин. Исследования физических воздействий на образование солеотложений проводились в Ленинградском институте инженеров водного транспорта, в Одесском политехническом институте, на Московском заводе «Котлоочистка», Институтом горючих ископаемых (ИГИ), в Ставропольском ГАУ, а в последнее время Московским специализированным пусконаладочным управлением треста «Оргпищепром» и ВНИЭКИ ПРОДМАШ.

В Кубанском государственном аграрном университете в области магнитной обработки жидкости работу проводили Н.И. Богатырев, А.В. Лопатченко, И.А. Потапенко, Г.И. Третьяков, Н.Н. Курзин, В.К. Андрейчук, И.С. Белюченко, Р.Д. Тлиш, А.Г. Демьянченко, В.А., что подтверждено патентами Российской Федерации. В направлении развития электротехнологий в сельскохозяйственном производстве известны работы таких авторов, как И.Ф. Бородин, В.А. Воробьёв, В.Ф. Сторчевой, П.Л. Лекомцев, В.В. Пилюгин, А.П. Тарасенко, С.О. Хомутов, Г.В. Никитенко, С.В. Оськин, и др.

**Научная проблема.** В теплицах с использованием геотермальных вод имеется высокий уровень солеотложений и большие эксплуатационные затраты на содержание теплотехнического оборудования. Существует электротехнологическое оборудование и соответствующие исследования по снижению солеотложений, но значительные энергозатраты этого оборудования не позволяют широко внедрять такие электротехнологии.

Для решения проблемы была сформулирована следующая **научная гипотеза:** создание методологическо-теоретической базы по комплексной обработке геотермальных вод в теплицах акустическим и магнитным полем и разработка соответствующего оборудования позволит снизить энергопотребление такими электротехнологическими установками и улучшить их эксплуатационные характеристики.

**Объектом исследования** является акусто-магнитная электротехнология и оборудование для предотвращения образования соляных отложений на поверхностях трубопроводов в системах теплоснабжения от геотермальных источников.

**Предметом исследования** является взаимосвязь характеристик акусто-магнитного аппарата с характеристиками теплоносителя геотермального источника и конструктивно-технологическими параметрами системы теплоснабжения; взаимосвязь частотных и электромагнитных зависимостей с конструктивными параметрами и режимами работы системы; связь количества накипеобразования и интенсивности акусто-магнитного поля.

**Цель исследования:** разработка теоретико-методической базы

с обоснованием параметров и режимов оборудования акусто-магнитной электротехнологии предотвращения образования солевых отложений на поверхностях трубопроводов в системе геотермального отопления гидропонных теплиц, способной снизить материальные и эксплуатационные затраты.

**Задачи исследований:**

1. Установить критерии подобия акусто-магнитного аппарата для проектирования и изготовления оборудования различного типоразмера и назначения.
2. Получить функциональную связь количества образованной накипи в минерализованном теплоносителе с протекающими процессами в акусто-магнитном поле.
3. Разработать математическую модель основных физических процессов, протекающих в акусто-магнитном аппарате, получить значения их параметров для предотвращения накипеобразования на внутренних поверхностях теплотехнического оборудования при работе на геотермальном минерализованном теплоносителе.
4. Разработать новые безреагентные способы обработки жидкости в тепличном производстве с получением структурных и функциональных схем электротехнологических процессов объекта исследований.
5. Провести математическую обработку полученных математических моделей тепловых, электромагнитных и акустических процессов, протекающих в установке с использованием современного программного обеспечения.
6. Разработать функциональную и структурную схемы акусто-магнитной электротехнологии в гидропонных установках с использованием минерализованных теплоносителей, системы автоматического управления техническим процессом обработки воды с обоснованием параметров составляющего оборудования.
7. Модернизировать методику планирования эксперимента с использованием обобщённых факторов и критериев подобия для исследований акусто-магнитных аппаратов.
8. Изготовить лабораторный стенд для экспериментальных исследований и макетный образец акусто-магнитного аппарата, определить его оптимальные параметры и режимы работы на основе

регрессионного анализа, сопоставить результаты математического и физического моделирования основных физических процессов, протекающих в аппаратах.

9. Экспериментально, в лабораторных и производственных условиях, подтвердить основные теоретические положения исследований и доказать работоспособность акусто-магнитных аппаратов с учетом их воздействия на гидропонный раствор и биологический объект.

10. Провести технико-экономическую оценку результатов внедрения в геотермальных гидропонных установках на основе использования низкопотенциального тепла и минерализованных теплоносителей.

**Научную новизну работы составляют:**

- обоснованные количество и состав критериев подобия, необходимых для описания процессов, происходящих в акусто-магнитном аппарате;
- уравнение, связывающее количество образованной накипи с протекающими процессами в акусто-магнитном поле через критерии подобия;
- математическая модель основных физических процессов, протекающих в акусто-магнитном аппарате, устанавливающая степень влияния параметров акусто-магнитного аппарата на степень солеотложения в минерализованных теплоносителях;
- новые безреагентные способы обработки жидкости в тепличном производстве при использовании геотермального низкопотенциального тепла;
- основные параметры магнестрикционного преобразователя и акусто-магнитного аппарата;
- модернизированная методика планирования эксперимента с использованием обобщённых факторов и критериев подобия.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

- полученные критерии подобия позволяют проектировать и изготавливать акусто-магнитное оборудование различного типоразмера;
- уравнение, связывающее количество образованной накипи с процессами в акусто-магнитном поле через критерии подобия, можно

применять для расчета минимального накипеобразования в оборудовании при его работе на геотермальном минерализованном теплоносителе;

- математическая модель основных физических процессов, протекающих в акусто-магнитном аппарате, может быть использована для обобщения совокупного опыта отработки аналогов в виде критериальных комплексов параметров;
- новые безреагентные способы обработки жидкости могут применяться не только в тепличном производстве, но и в других технологиях сельского хозяйства при использовании геотермального низкопотенциального тепла; новизна способов защищена патентами РФ № 2654334, РФ №2641822;
- получены конструктивные решения электротехнологического оборудования (патенты РФ № 2635591, №2641137, №2646091, №2646989), которые могут быть реализованы на предприятиях-производителях электротехнических аппаратов;
- значения параметров и соответствующие расчетные формулы акусто-магнитного аппарата, необходимые для определения рациональных режимов работы оборудования и конструирования аппаратов для других производительностей и типоразмеров;
- модернизированная методика планирования эксперимента с использованием обобщённых факторов и критериев подобия позволяет разработать план эксперимента, провести его с наименьшей трудоемкостью и получить оптимальное значение параметров акусто-магнитного аппарата;
- структурные, функциональные и принципиальные схемы акусто-магнитной электротехнологии в гидропонных установках и системы автоматического управления техническим процессом обработки воды, которые могут быть использованы при разработке технологии обработки и других жидкостей;
- уравнения регрессии, позволяющие определить рациональные режимы работы акусто-магнитного аппарата;
- результаты моделирования в среде ELCUT могут использоваться в дальнейшем в виде геометрической модели объекта исследований для исследования влияния различных видов напряжений,



решения нелинейных задач стационарной теплопроводности, определения характеристик магнитного поля в рабочей зоне акусто-магнитного аппарата;

- программы, реализованные в среде CoDeSys, можно применять для различных контроллеров при проведении автоматизации акусто-магнитной обработки теплоносителя в системах теплоснабжения объектов;
- результаты внедрения акусто-магнитной технологии в теплицах на теплотехническом оборудовании и в системе подготовки гидроропного раствора подтверждают высокую эффективность данной электротехнологии.

**Методология и методы исследований.** Теоретико-методологическими основами диссертационной работы являются системный подход, методы системного анализа, математической статистики, теории подобия, моделирования, планирования эксперимента, метод конечных разностей. В теоретических исследованиях использовались законы акустики, магнетизма, теории систем, теплотехники, теории подобия. Лабораторные и производственные исследования проводились с использованием стандартных методик, приборов и оборудования. В экспериментальных исследованиях применялись совмещенные методы теории планирования эксперимента и теории подобия, а также метод конечных разностей, методы контроля, основанные на косвенных показателях, методы контроля, основанные на учете количества выделившейся твердой фазы.

**Положения, выносимые на защиту:**

- критерии подобия акусто-магнитного аппарата для проектирования и изготовления оборудования различного типоразмера и назначения;
- уравнение, связывающее количество образованной накипи в минерализованном теплоносителе с процессами в акусто-магнитном поле через критерии подобия;
- математическая модель основных физических процессов, протекающих в акусто-магнитном аппарате, устанавливающая степень влияния его параметров на основной показатель качества водного раствора;

- новые безреагентные способы и конструктивные решения для обработки жидкости в теплотехническом оборудовании при использовании геотермального низкопотенциального тепла и в системе подготовки гидропонного раствора;
- параметры акусто-магнитных аппаратов для предотвращения накипеобразования на теплотехническом и гидропонном оборудовании при использовании геотермального низкопотенциального тепла;
- модернизированная методика планирования эксперимента с использованием обобщённых факторов и критериев подобия;
- структурная и функциональные схемы акусто-магнитной электро-технологии в гидропонных установках с использованием геотермального тепла;
- результаты моделирования тепловых, электромагнитных и акустических процессов, протекающих в установке с использованием современного программного обеспечения;
- уравнения регрессии, позволяющие определить рациональные режимы работы акусто-магнитного аппарата;
- результаты сопоставления математического и физического моделирования основных физических процессов, протекающих в акусто-магнитных аппаратах;
- рекомендации по производству акусто-магнитных аппаратов и их технико-экономическая оценка.

### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность выводов и предложений подтверждается сходимостью результатов теоретических, экспериментальных, производственных исследований, а также использованием современных исследовательских методик и измерительного оборудования.

Эффективность новой электротехнологии по снижению солеотложений на теплотехническом оборудовании с использованием геотермальных источников подтверждена производственными испытаниями и внедрением на тепличных предприятиях Республики Адыгея. Переданы рекомендации по установке и эксплуатации акусто-магнитных аппаратов на теплотехническом оборудовании в министерство топливно-энергетического комплекса и жилищно-комму-

нального хозяйства Краснодарского края.

Основные положения диссертационной работы доложены и одобрены на: XIV Международной научно-практической конференции «Современные концепции научных исследований» (Москва, 2015); X Международной научно-практической конференции "Наука и образование" (2015. Мюнхен, Германия); XI Международной научно-практической конференции "Наука и образование" (2016. г. Мюнхен, Германия); XVI Международной научно-практической конференции "Наука и образование" (2017 г. Мюнхен, Германия); XVII Международной научно-практической конференции "Европейская наука и технологии"(2017. г. Мюнхен, Германия); Международной научно-технической конференции «Автоматизация. Русавтокон» (2018 г.); Международной научно-технической конференции «Автоматизация. Русавтокон» (2019 г.); XVII Международной научной конференции «Инженерное обеспечение развития сельских районов» (2018 г., Елгава, Латвия); XVIII Международной научной конференции «Инженерное обеспечение развития сельских районов» (2019 г., Елгава, Латвия); XIX Международной научной конференции «Инженерное обеспечение развития сельских районов» (2020 г., Елгава, Латвия); Международной научно-технической конференции «Автоматизация. Русавтокон» (2020 г.).

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 44 печатных изданиях, в том числе в 12 статьях в международных базах данных Scopus и Web of Science, 11 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 1 монографии, 7 патентах на изобретения и способы.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений, изложена на 350 странице компьютерного текста, в том числе на 317 страницах основного текста с 25 таблицами, 112 иллюстрациями, список литературы состоит из 211 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение.** Отражает актуальность выполненного исследования, цели и задачи, научную новизну, практическую значимость и основные научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены агротехнологии защищенного грунта для выращивания теплолюбивых культур. В соответствии с технологическими требованиями дана классификация теплиц.

Для юга России сегодня характерно применение геотермальных источников. В Краснодарском крае уже эксплуатируется 50 геотермальных скважин, из которых добывается до 10 млн. м<sup>3</sup> воды с температурой 75–100 °С, что позволяет замещать до 45 тыс. тонн условного топлива. По теплосодержанию источник горячей воды с температурой 100°С и дебитом 1000 м<sup>3</sup> в сутки является эквивалентом котельной, в которой тратится 20 т угля или 10 т нефти в сутки на нагрев холодной воды. Затраты на сооружение комплексов по утилизации подземных термальных вод, на цели теплоснабжения населенных пунктов и предприятий, в том числе тепличных хозяйств, в 10 раз меньше затрат на добычу и транспортировку топлива для этих целей.

При анализе состояния теплотехнического оборудования выявлено, что отложение различных солей на стенках теплоэнергетических аппаратов приводит к резкому снижению эффективности их работы, перерасходу топлива и частым остановкам для очистки. Основная задача подготовки воды в котельных состоит в предотвращении образования накипи на внутренних поверхностях теплоэнергетического оборудования во избежание коррозии, т.к. эти процессы приводят к уменьшению срока службы тепловых сетей в 3,6 раза, снижению гидродинамики, износу насосов, перерасходу топлива до 12% на 1 мм отложений, уменьшению теплопроводности на 5–8% на 1 мм отложений.

Анализ существующих методов снижения солеотложения в теплотехнических системах показывает, что на данный момент основными способами умягчения воды для теплосетей являются методы ионного обмена, реагентные и безреагентные методы. Но практически все методы направлены на устранение уже возникших проблем, а не на предотвращение их возникновения. Использование безреагентных методов совместно с химической водоподготовкой, позволяет уменьшить количество накипи, образованной на внутренних стенках теплоэнергетического оборудования, и продлить срок их

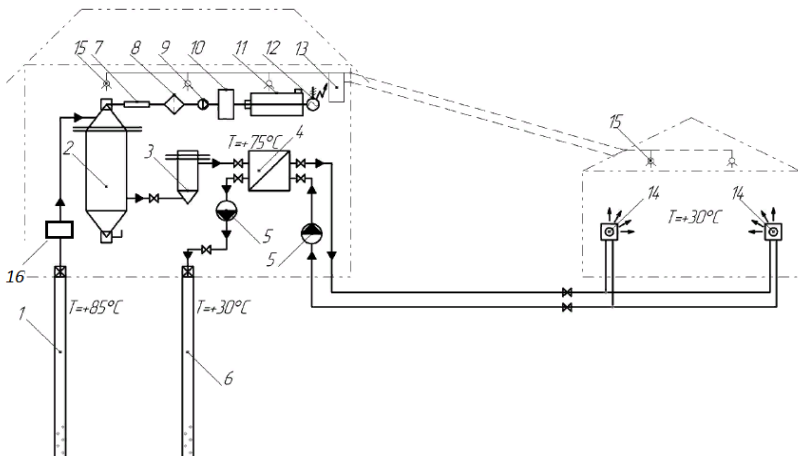
службы.

Исследование литературных источников выявило отсутствие единой точки зрения на суть магнитной обработки и её месте в методологии. В литературе содержатся о расчеты магнитных и электрических параметров устройств для магнитной водоподготовки, но отсутствуют теоретические и экспериментальные обоснования расчета магнитных устройств в зависимости от качества воды.

Анализ уравнений, описывающих электромагнитные поля, показал, что волны распространяются в ферритах с небольшим затуханием, обнаруживая при этом ряд существенных особенностей (эффект Фарадея, Эффект Коттона-Мутона). Обычно акустическое поле описывается системой трех дифференциальных уравнений. Строгое решение системы уравнений в теории динамической упругости твердого тела с учетом всех граничных условий в ряде случаев наталкивается на непреодолимые математические трудности. Магнито-стрикционные явления должны описываться тензорными соотношениями, учитывающими анизотропию магнитных и упругих свойств. Однако, применяемые металлы имеют поликристаллическую структуру, что позволяет рассматривать их как изотропные тела. Это сводит тензорные соотношения к скалярным. В результате проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследований.

**Во второй главе** производилось моделирование акусто-магнитного аппарата (АМА) и установлены критерия подобия. Проведена модернизация технологического процесса воздушно-конвекционного отопления тепличного комплекса с использованием геотермального источника энергии (рис. 1).

Чтобы установить АМА необходимо выполнить ряд условий, что позволит оптимизировать процесс образования накипи на стенках труб и теплотехническом оборудовании. Основное условие – установка АМА на выходе геотермальной скважины перед системой дегазации. Количество устанавливаемых аппаратов зависит от диаметра подающей трубы и расхода воды, а также от типа АМА. Все аппараты должны подключаться параллельно друг другу и шламоуловителям. Диаметр подающего трубопровода имеет большую величину, поэтому АМА врезаются параллельно трубе.

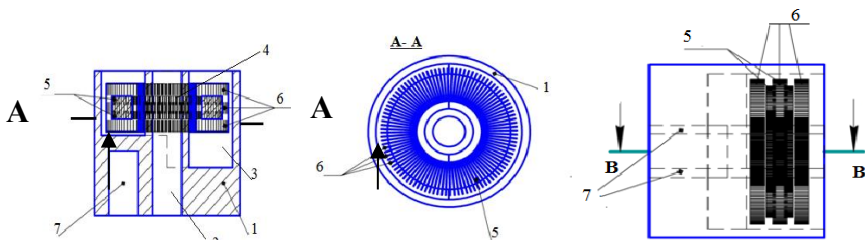


1 – скважина геотермальной воды; 2 – сепаратор; 3 – фильтр; 4 – теплообменник; 5 – насос; 6 – нагнетательная скважина; 7 – трубчатый конденсатор; 8 – сетчатый фильтр; 9 – вакуум – компрессор; 10 – ресивер; 11 – модифицированный ДВС; 12 – электрогенератор; 13 – электрический щит; 14 – калорифер; 15 – лампы освещения; 16 – АМА.

**Рисунок 1 – Принципиальная схема модернизированного воздушно-конвекционного отопления тепличного комплекса с использованием геотермального источника энергии**

Для больших часовых расходов воды допускается обрабатывать до 30% потока раствора. Перед установкой АМА необходимо выполнить ревизию всей системы подачи геотермальной воды, произвести замену трубопроводов, фильтров, очистить теплообменник от старой накипи. Общий вид АМА, который предполагается установить в технологическую схему подготовки геотермальной воды, показан на рис. 2.

Устройство для акустической и магнитной обработки жидкости имеет корпус из диамагнитного материала с отверстием. Корпус имеет проточку для электромагнитной системы, которая состоит из ферритового тороидального магнитопровода и расположенной на нем катушки с тремя обмотками и выводами, подключенными по схеме «звезда» к источнику питания. Корпус имеет разъем для подключения выводов обмотки к источнику трехфазного переменного тока, который создает переменное напряжение в резонансном звуковом диапазоне частот 32–35 кГц.



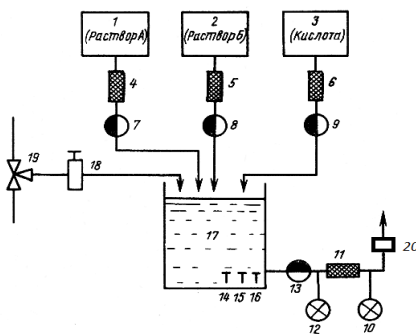
1 – корпус; 2 – отверстие; 3 – проточка корпуса; 4 – электромагнитная система; 5 – ферритовый тороидальный магнитопровод; 6 – катушки с тремя обмотками и выводами; 7 – разъем для подключения выводов обмотки

Рисунок 2 – Общий вид устройства и сечение А-А

При модернизации технологического процесса подачи питательного раствора предлагается изменить схему растворного узла, добавив в неё аппарат для безреагентной обработки жидкости и фильтры (рис. 3). Количество противонакипных устройств зависит от часового расхода воды и от типа установленного аппарата. Аппараты следует подключать после рабочего насоса, установленного на выходе из бака с маточным раствором. Очередность установки аппаратов и фильтров непринципиальна, но предпочтительнее, чтобы аппараты устанавливались до фильтров.

При моделировании необходимо, чтобы модель была подобна изучаемому объекту. Это означает, что ее параметры и параметры оригинала должны находиться в некоторых вполне определенных соотношениях, вытекающих из первой теоремы подобия, а описание изучаемого объекта в соответствии со второй теоремой подобия должно проводиться с помощью обобщенных параметров.

Согласно третьей теореме подобия необходимым и достаточным условием для создания подобия является соответствие сходственных параметров, входящих в условия однозначности, и равенство определяющих критериев подобия. К условиям однозначности относятся факторы и условия, независимые от механизма самого явления: геометрические свойства системы; физические параметры среды и тел, образующих систему; начальное состояние системы; условия на границах системы и кавитирующей жидкости; взаимодействие объекта и среды.



1-3 – баки с маточными растворами; 4-6, 11 – фильтры; 7-9 – насосы; 10, 12 – манометры; 13 – рабочий насос; 14-16 – датчики электрической проводимости, кислотности, температуры; 17 – бак для приготовления питательного раствора; 18 – электромагнитный клапан; 19 – смесительный клапан; 20 – аппарат для безреагентной обработки жидкости.

Рисунок 3 – Блок-схема растворного узла

Был разработан новый метод подоби́я, который базируется на соблюдении условий: подобие электромагнитных полей в однородной изотропной среде; подобие электромагнитных полей в неоднородной и анизотропной среде; подобие движущихся электромагнитных полей; подобие тепловых процессов в АМА; подобие неустановившегося движения несжимаемой жидкости, проходящей через АМА; подобие геометрических размеров АМА. Экспериментальные данные, оформленные в критериальной форме, использованы для планирования экспериментов. Шаг варьирования факторов соответствовал шагу варьирования критериев подоби́я. Далее, согласно методам планирования эксперимента, произведён выбор необходимого плана эксперимента и составлена матрица планирования эксперимента для одной из серий опытов. При этом шаг отклонения критериев подоби́я задавался с помощью вариации параметров, входящих в них. В соответствии с матрицей планирования проводились все опыты и определялось критериальное уравнение регрессии. Оценка коэффициентов уравнения регрессии происходила в соответствии с ПРЕСС-процедурой, предложенной в работе Аллена. Построенная модель была проверена на точность и адекватность.

Были установлены и созданы критериальные зависимости: обобщенные критерии геометрических параметров разных типов и



конструкций АМА; критерии, связывающие физические параметры внешней среды и акусто-магнитного аппарата; критерий, устанавливающий отношение температуры окружающей среды к тепловому режиму работы аппарата; критерии, устанавливающие начальное состояние цепи, содержащей взаимные индуктивности; критерий, устанавливающий условия на границах системы и кавитирующей жидкости.

Для установления критериев начального состояния цепи была рассмотрена схема замещения электромагнитной составляющей АМА (рис. 4). Временную диаграмму работы источников ЭДС в цепи АМА можно увидеть на рис. 5.

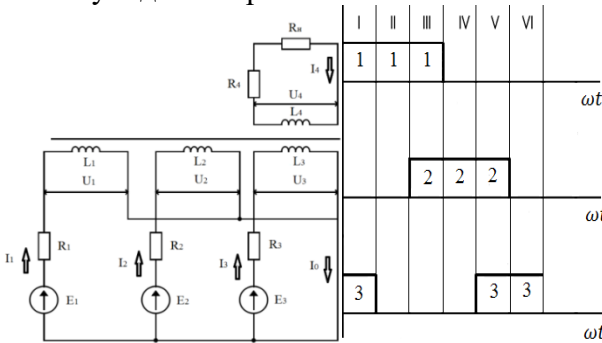


Рисунок 4 – Схема замещения электромагнитной составляющей акусто-магнитного аппарата

Рисунок 5 – Временные диаграммы работы источников ЭДС

Источники напряжения  $E_1, E_2, E_3$ , выдают прямоугольный сигнал одной частоты со смещением во времени на одну треть часть периода. Если ввести переменные типа boolean для состояний источников напряжения соответственно: 1 – «на источнике присутствует напряжение», 0 – «напряжение источник питания не выдаёт», то алгоритм подачи напряжения за один период одного из источников на акусто-магнитный аппарат можно записать в виде:  $\frac{1}{6}T: E_1=1, E_2=0, E_3=1; \frac{2}{6}T: E_1=1, E_2=0, E_3=0; \frac{3}{6}T: E_1=1, E_2=1, E_3=0; \frac{4}{6}T: E_1=0, E_2=1, E_3=0; \frac{5}{6}T: E_1=0, E_2=1, E_3=1; T: E_1=0, E_2=0, E_3=1$ .

Системы уравнений для схемы замещения имеют вид:

$$\begin{cases} u_1 = I_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{14} \frac{di_4}{dt} \\ u_2 = I_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{24} \frac{di_4}{dt} \\ u_3 = I_3 R_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{34} \frac{di_4}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} 0 = I_4 R'_4 + L_4 \frac{di_4}{dt} - M_{14} \frac{di_1}{dt} \\ 0 = I_4 R'_4 + L_4 \frac{di_4}{dt} - M_{24} \frac{di_2}{dt} \\ 0 = I_4 R'_4 + L_4 \frac{di_4}{dt} - M_{34} \frac{di_3}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

где  $M_{14}$  – ЭДС взаимной индукции между катушками  $L_1$  и  $L_4$ ,  $M_{24}$  – ЭДС взаимной индукции между катушками  $L_2$  и  $L_4$ ,  $M_{34}$  – ЭДС взаимной индукции между катушками  $L_3$  и  $L_4$ ,  $R'_4 = R_4 + R_H$ .

Магнитная энергия трёх магнитосвязанных катушек с токами  $I_1, I_2, I_3$  равна:

$$W_m = \frac{L_1 I_1^2}{2} + \frac{L_2 I_2^2}{2} + \frac{L_3 I_3^2}{2} \pm M_{12} I_1 I_2 \pm M_{13} I_1 I_3 \pm M_{23} I_2 I_3. \quad (3)$$

Общий ток в цепи может принимать значения:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_3, \dot{I}_0 = \dot{I}_1, \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2, \dot{I}_0 = \dot{I}_2, \dot{I}_0 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3, \dot{I}_0 = \dot{I}_3. \quad (4)$$

Согласно второму закону Кирхгофа уравнение для согласного включения катушек в момент когда  $E_1=1, E_2=1$  имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 (R_1 + j\omega L_1) + \dot{I}_2 j\omega M_{12} = \dot{E}_1 \\ \dot{I}_1 j\omega M_{12} + \dot{I}_2 (R_2 + j\omega L_2) = \dot{E}_2 \end{cases} \quad (5)$$

В соответствии со вторым законом Кирхгофа уравнение для согласного включения катушек в момент, когда  $E_1=1, E_3=1$ , имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 (R_1 + j\omega L_1) + \dot{I}_3 j\omega M_{13} = \dot{E}_1 \\ \dot{I}_1 j\omega M_{13} + \dot{I}_3 (R_3 + j\omega L_3) = \dot{E}_3 \end{cases} \quad (6)$$

В соответствии со вторым законом Кирхгофа уравнение для согласного включения катушек в момент, когда  $E_2=1, E_3=1$ , имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{I}_2 (R_2 + j\omega L_2) + \dot{I}_3 j\omega M_{23} = \dot{E}_2 \\ \dot{I}_2 j\omega M_{23} + \dot{I}_3 (R_3 + j\omega L_3) = \dot{E}_3 \end{cases} \quad (7)$$

Нагрузка имеет индуктивный характер  $z_H = z_H e^{j\varphi_H}$ . Напряжение на нагрузке  $U_H$  опережает ток  $I_H$  на угол  $\varphi_H$ . Падение напряжения  $\dot{I}_4 R_4$  совпадает по фазе с током  $\dot{I}_2$ .

В соответствии с первым дополнительным положением, си-

стемы подобны, если соответственно подобны составляющие их подсистемы. Состояние системы в момент времени  $\frac{2}{6}T$ , можно описать системой уравнений:

$$\begin{cases} u_1 = I_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{14} \frac{di_4}{dt} \\ 0 = I_4 R'_4 + L_4 \frac{di_4}{dt} - M_{14} \frac{di_1}{dt}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $M_{14}$  – ЭДС взаимной индукции между катушками  $L_1$  и  $L_4$ ,  $M_{24}$  – ЭДС взаимной индукции между катушками  $L_2$  и  $L_4$ ,  $M_{34}$  – ЭДС взаимной индукции между катушками  $L_3$  и  $L_4$ .

При использовании способа интегральных аналогов находим пять критериев подобия, разделив соответственно на  $I_1 R_1$  и  $I_4 R'_4$  уравнения системы (2):

$$\begin{aligned} \pi_1^y &= \frac{U}{I_1 R_1} = \frac{I_1 \infty}{I_1}; \pi_2^y = \frac{L_1}{R_1 t} = \frac{T_{L_1}}{t}; \pi_3^y = \frac{M_{14}}{R_1 t} \cdot \frac{I_4}{I_1} = \frac{T_{M_1}}{t} \cdot \frac{I_4}{I_1}; \pi_4^y = \frac{L_4}{R'_4 t} = \\ &= \frac{T_{L_4}}{t}; \pi_5^y = \frac{M_{14}}{R'_4 t} \cdot \frac{I_4}{I_4} = \frac{T_{M_4}}{t} \cdot \frac{I_2}{I_4}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $T_{M_1} = \frac{M_{14}}{R_1}$ ,  $T_{M_4} = \frac{M_{14}}{R_4}$  – постоянные времени взаимной индукции соответственно контуров 1 и 4.

Установлены критерии подобия с помощью  $\pi$ -теоремы. Для первого контура имеем набор параметров:  $U_1, I_1, I_4, R_1, L_1, M_{14}, t$ , а число форм записи  $F_{\pi_1} = 21, F_{\pi_4} = 10$ . Независимые параметры:  $I_4, R'_4, t$  для второго и  $I_1, R_1, t$  первого контура. При этом получены семь критериев подобия:

$$\pi_1 = \frac{U}{I_1 R_1}; \pi_2 = \frac{L_1}{R_1 t}; \pi_3 = \frac{M_{14}}{R_1 t}; \pi_4 = \frac{I_4}{I_1}; \pi_5 = \frac{L_4}{R'_4 t}; \pi_6 = \frac{M_{14}}{R'_4 t}; \pi_7 = \frac{I_1}{I_4}. \quad (10)$$

При этом  $\pi_3^y = \pi_3 \cdot \pi_4$ , а  $\pi_5^y = \pi_6 \cdot \pi_7$ . Остальные критерии ( $\pi_1^y, \pi_2^y, \pi_4^y$ ) совпадают с соответствующими критериями, полученными на базе  $\pi$ -теоремы ( $\pi_1, \pi_2, \pi_5$ ). Имеем критериальные уравнения, соответствующие контурам 1 и 4:

$$\pi_1 = f_1(\pi_2, \pi_3, \pi_4); \pi_7 = f_2(\pi_5, \pi_6). \quad (11)$$

Выражение критерия  $\pi_7$  эквивалентно критерию  $\pi_4$ . В итоге получено для момента времени  $\frac{2}{6}T$  критериальное уравнение:

$$(U_1)\pi_1 = f_3(\pi_2 \pi_3 \pi_5 \pi_6). \quad (12)$$

Для подобия процессов необходимо и достаточно равенство четырёх определяющих критериев:

$$\pi_2 = \frac{T_{L1}}{t}; \pi_3 = \frac{T_{M1}}{t}; \pi_5 = \frac{T_{L4}}{t}; \pi_6 = \frac{T_{M4}}{t}. \quad (13)$$

Полученные критерии подобия остаются справедливыми для моментов времени  $\frac{4}{6}T$  и  $T$ . По аналогии с моментом времени  $\frac{2}{6}T$  критериальное уравнение для момента времени  $\frac{4}{6}T$  имеет вид:  $(U_2)\pi_8=f_6(\pi_9, \pi_{10}, \pi_5, \pi_{14})$ .

Соответственно критериальное уравнение для момента времени  $T$ :

$$(U_3)\pi_{15}=f_9(\pi_{16}, \pi_{17}, \pi_5, \pi_{20}). \quad (14)$$

Установлены критерии подобия и критериальные уравнения для других моментов времени:

$$\frac{1}{6}T: \pi_{22} = \frac{M_{13}}{R_1 t}; \pi_{23} = \frac{I_3}{I_1}; \pi_{24} = \frac{M_{31}}{R_3 t_3}; \pi_{25} = \frac{I_1 \cdot \pi_{22}^{y1}}{I_3} = \frac{U_1}{I_1 R_1} = \pi_1; \pi_{23}^{y1} = \frac{L_1}{R_1 t_1} = \pi_2; \pi_{24}^{y1} = \pi_{26} = \pi_{20} \pi_4; \pi_{25}^{y1} = \pi_{27} = \pi_{22} \pi_{23}; \pi_{22}^{y2} = \pi_{15}; \pi_{23}^{y2} = \pi_{16}; \pi_{24}^{y2} = \pi_{28} = \pi_{24} \pi_{25}; \pi_{25}^{y2} = \pi_{29} = \pi_{22} \pi_{23}. \quad (15)$$

$$\frac{3}{6}T: \pi_{22}^{y3} = \frac{U_1}{I_1 R_1} = \pi_1; \pi_{23}^{y3} = \frac{L_1}{R_1 t_3} = \pi_2; \pi_{24}^{y3} = \pi_{36} = \pi_{31} \cdot \pi_{32}; \pi_{25}^{y3} = \pi_{37} = \pi_3 \cdot \pi_{34}; \pi_{22}^{y4} = \pi_8; \pi_{23}^{y4} = \pi_9; \pi_{24}^{y4} = \pi_{38} = \pi_{33} \pi_{35}; \pi_{25}^{y4} = \pi_{39} = \pi_{10} \cdot \pi_{11}.$$

$$(U_1, U_2)\pi_{40}=f_{11}(\pi_1, \pi_2, \pi_8, \pi_9, \pi_{36}, \pi_{37}, \pi_{38}, \pi_{39}). \quad (16)$$

$$\frac{5}{6}T: \pi_{41} = \frac{M_{34}}{R_1 t}; \pi_{42} = \frac{I_2}{I_3}; \pi_{43} = \frac{M_{32}}{R_1 t_5}; \pi_{44} = \frac{M_{23}}{R_2 t_5}; \pi_{45} = \frac{I_3}{I_2}.$$

$$\pi_{22}^{y5} = \frac{U_3}{I_3 R_3} = \pi_{15}; \pi_{23}^{y5} = \frac{L_3}{R_3 t_5} = \pi_{16}; \pi_{24}^{y5} = \pi_{46} = \pi_{41} \cdot \pi_{18}; \pi_{25}^{y5} = \pi_{47} = \pi_{43} \cdot \pi_{42}; \pi_{22}^{y6} = \pi_8; \pi_{23}^{y6} = \pi_9; \pi_{24}^{y6} = \pi_{48} = \pi_{10} \cdot \pi_{11}; \pi_{25}^{y6} = \pi_{49} = \pi_{44} \cdot \pi_{45}.$$

$$(U_2, U_3)\pi_{50}=f_{12}(\pi_1, \pi_2, \pi_8, \pi_9, \pi_{36}, \pi_{37}, \pi_{38}, \pi_{39}). \quad (17)$$

Окончательный критерий, устанавливающий начальное состояние цепи:

$$\pi_{51}=f_{13}(\pi_1, \pi_8, \pi_{15}, \pi_{30}, \pi_{40}, \pi_{50}). \quad (18)$$

*Критерии, связывающие физические параметры внешней среды и АМА.* Отношение реактивной составляющей напряжения на

зажимах аппарата к напряжению на входе всей цепи можно представить критерием подобия:

$$\pi_{52} = \frac{U_p}{U_{вх}}. \quad (19)$$

Критерий подобия, связанный с отношением падения напряжения на активном сопротивлении обмотки ко всему напряжению:

$$\pi_{53} = \frac{U_{акт}}{U_{вх}}. \quad (20)$$

Отношение реактивной составляющей напряжения к падению напряжения на активном сопротивлении обмотки можно выразить путем деления критерия  $\pi_{53}$  на  $\pi_{52}$

$$\pi_{54} = \frac{\pi_{53}}{\pi_{52}} = \frac{U_{акт}}{U_p}. \quad (21)$$

Критерий подобия, характеризующий зависимость входного с выходным параметром:

$$\pi_{55} = \frac{4\pi n S k_m a_{мс} i}{\bar{F} R_{нап}}. \quad (22)$$

Получен критерий подобия использующий колебательную скорость на выходе АМА, используя условие подобия:

$$\pi_{56} = \frac{4\pi n S k_m a v}{U R_{вн}}. \quad (23)$$

Получен критерий, связывающий физические параметры, поступающие из среды с выходными параметрами аппарата путем деления критерия  $\pi_{56}$  на  $\pi_{55}$ :

$$\pi_{57} = \frac{\pi_{56}}{\pi_{55}} = \frac{4\pi n S k_m a_{мс} v}{U R_{нап}} \cdot \frac{\bar{F} R_{нап}}{4\pi n S k_m a_{мс} i} = \frac{v \bar{F}}{U i}. \quad (24)$$

*Критерии, устанавливающие отношение температуры окружающей среды к тепловому режиму работы аппарата.* На основе предположения о том, что величина площади аппарата и магнитопровода постоянна, не зависит от мощности аппарата, введен коэффициент подобия:

$$\pi_{58} = \frac{F_0}{F}, \quad (25)$$

где  $F$  – площадь поверхности магнитопровода,  $m^2$ ,  $F_0$  – площадь поверхности аппарата,  $m^2$ .

С целью проверки гипотезы  $\pi_{58} = const$  проведена серия экспериментов с аппаратами различной мощности и фактически  $\pi_{58} = 1,05$ . Критерий  $\pi_{59}$  является эмпирической величиной

$$\pi_{59} = \frac{F_0}{F} \alpha_0. \quad (26)$$

Принято допущение, что условия охлаждения одинаковы по всей поверхности, и все коэффициенты теплообмена равны между собой:  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_0$ . Подобие процесса теплоотдачи устанавливается критерием:

$$\pi_{60} = \frac{(r_0 i^2 + P_c)}{(\Theta - T_{\text{охл}})(\alpha_0 F - \chi r_0 i^2)}. \quad (27)$$

*Критерий, устанавливающий условия на границах системы и кавитирующей жидкости:*

$$\pi_{61} = \frac{v_m \rho_k c_k}{2 p_3}. \quad (28)$$

*Обобщенные критерии геометрических параметров акусто-магнитного аппарата.* Сердечник акусто-магнитного аппарата характеризуется тремя линейными размерами:  $a = D_{\text{нар}} - D_{\text{вн}}$ ,  $b$ ,  $c = d$ . Установлены критерии  $\pi_{62} = \frac{c}{a}$ ,  $\pi_{63} = \frac{b}{a}$ , где  $\pi_{62}$  – отношение внутреннего диаметра к базисному размеру;  $\pi_{63}$  – отношение ширины кольца к базисному размеру. Обобщенные геометрические параметры имеют вид:

$$\begin{aligned} S_c &= \pi_{63} a^2, \quad S_0 = \frac{\pi}{4} (2 - \pi_{64}) \pi_{64} \pi_{62}^2 a^2, \quad (29) \\ l_0 &= \left( \frac{\pi}{8} \left[ \frac{(\pi_{62} + 1)(2 - \pi_{64}) \pi_{64} \pi_{62}^2}{\pi_{29}(\pi_{29} + 2)} + \right. \right. \\ &+ \sqrt{(\pi_{62} + 2)^2 + (2 - \pi_{64}) \pi_{64} \pi_{62}^2} + (\pi_{64} + 1) \cdot \pi_{62} - (\pi_{62} + 2) \left. \right] + \\ &\left. + 2 \sqrt{\frac{(2 - \pi_{64}) \pi_{64} \pi_{62}^2}{4 \pi_{62}(\pi_{62} + 2)} + 1 + 2 \pi_{63}} \right) a. \quad (30) \end{aligned}$$

Критерий заполнения окна обмоткой  $\pi_{64}$  имеет выражение:

$$\pi_{64} = \frac{\pi_{62} - \frac{d_0}{a}}{\pi_{62}}. \quad (31)$$

Критерий  $\pi_{65}$  находится как отношение потерь в сердечнике к потерям в обмотке:

$$\pi_{65} = \frac{P_c}{r_0 i^2}. \quad (32)$$

*Критериальное уравнение геометрических параметров АМА:*

$$\pi_{66} = f_{14}(\pi_{62}, \pi_{63}, \pi_{64}, \pi_{65}). \quad (33)$$

*Критерий подобия электромагнитных полей, создаваемых*

периодическими переменными токами:

$$\pi_{67} = \pi'_{11ЭМ} = \mu \varepsilon l^2 \omega^2, \quad (34)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $l$  – длина рабочей части аппарата;  $\omega$  – круговая частота тока ( $2\pi f$ );  $\mu$  – магнитная проницаемость.

$$\xi_{pp} = \left\{ \begin{array}{l} \pi_{54} = \frac{U_{акт}}{U_p}; \\ \pi_{57} = \frac{v^F}{U_i}; \\ \pi_{60} = \frac{(r_0 i^2 + P_c)}{(\theta - T_{охл})(\alpha_0 F - \chi r_0 i^2)}; \\ \pi_{61} = \frac{v m P_c k_k}{2 p_3}; \\ \pi_{67} = \mu \varepsilon L_{акз}^2 \omega^2; \quad \pi_{66} = \begin{cases} \pi_{62} = \frac{c}{a}; \\ \pi_{63} = \frac{b}{a}; \\ \pi_{64} = \frac{\pi_{62} - d_0}{\frac{P_c}{r_0 i^2}}; \\ \pi_{65} = \frac{P_c}{r_0 i^2}; \end{cases} \\ \pi_{51} = \left\{ \begin{array}{l} \pi_1 = \frac{U}{I_1 R_1}; \pi_2 = \frac{L_1}{R_1 t}; \pi_3 = \frac{M_{14}}{R_1 t}; \pi_5 = \frac{L_4}{R_4 t}; \pi_6 = \frac{M_{14}}{R_4 t} \\ (U_1) \pi_1 = F_1 (\pi_2 \pi_3 \pi_5 \pi_6); \\ \pi_8 = \frac{U_2}{I_2 R_2}; \pi_9 = \frac{L_2}{R_2 t}; \pi_{10} = \frac{M_{24}}{R_2 t}; \pi_{13} = \frac{M_{24}}{R_4 t} \\ (U_2) \pi_8 = f_2 (\pi_9, \pi_{10}, \pi_5, \pi_{13}) \\ \pi_{16} = \frac{L_3}{R_3 t}; \pi_{17} = \frac{M_{34}}{R_3 t}; \pi_{20} = \frac{M_{34}}{R_4 t}; \\ (U_3) \pi_{15} = f_9 (\pi_{16}, \pi_{17}, \pi_5, \pi_{20}); \\ \pi_{15} = \frac{U_3}{I_3 R_3}; \pi_{16} = \frac{L_3}{R_3 t}; \pi_{17} = \frac{M_{34}}{R_3 t}; \pi_{26} = \pi_{20} \cdot \pi_4 = \frac{M_{14}}{R_1 t} \cdot \frac{I_4}{I_1}; \\ (U_1, U_3) \pi_{30} = f_{10} (\pi_1, \pi_2, \pi_{15}, \pi_{16}, \pi_{17}, \pi_{26}, \pi_{27}, \pi_{28}, \pi_{29}). \\ \pi_{27} = \pi_{22} \cdot \pi_{23} = \frac{M_{13}}{R_1 t_1} \cdot \frac{I_3}{I_1}; \pi_{28} = \pi_{24} \cdot \pi_{25} = \frac{M_{31}}{R_3 t_3} \cdot \frac{I_1}{I_3}; \\ \pi_{29} = \pi_{22} \cdot \pi_{23} = \frac{M_{34}}{R_3 t_3} \cdot \frac{I_4}{I_3}; \\ (U_1, U_2) \pi_{40} = f_{11} (\pi_1, \pi_2, \pi_8, \pi_9, \pi_{36}, \pi_{37}, \pi_{38}, \pi_{39}) \\ \pi_{36} = \pi_{31} \cdot \pi_{32} = \frac{M_{12}}{R_1 t_3} \cdot \frac{I_2}{I_1}; \pi_{37} = \pi_3 \cdot \pi_{34} = \frac{M_{14}}{R_1 t_3} \cdot \frac{I_4}{I_1}; \\ \pi_{38} = \pi_{33} \cdot \pi_{35} = \frac{M_{21}}{R_2 t_3} \cdot \frac{I_1}{I_2}; \\ \pi_{39} = \pi_{10} \cdot \pi_{11} = \frac{M_{24}}{R_2 t_3} \cdot \frac{I_4}{I_2}; \\ (U_2, U_3) \pi_{50} = f_{12} (\pi_1, \pi_2, \pi_8, \pi_9, \pi_{36}, \pi_{37}, \pi_{38}, \pi_{39}). \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (35)$$

Уравнение, связывающее количество образованной накипи с протекающими процессами в акусто-магнитном поле, имеет вид:

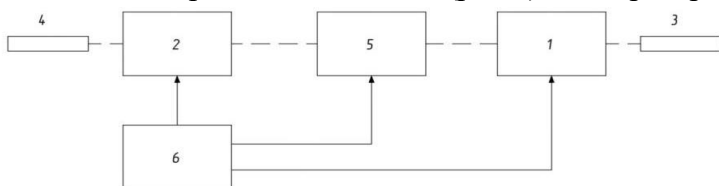
$$\xi_{pp} = f_{15} (\pi_{51}, \pi_{54}, \pi_{57}, \pi_{60}, \pi_{61}, \pi_{66}, \pi_{67}), \quad (36)$$

где  $\xi_{pp}$  – коэффициент противонакипного эффекта.

Полученная система уравнений (35), является математической

моделью процесса накипеобразования. Эту систему затруднительно решить аналитически, но существуют методы теории подобия для анализа результатов экспериментальной отработки сложных изделий, заключающиеся в обобщении совокупного опыта отработки аналогов в виде критериальных комплексов параметров.

**В третьей главе** проведен синтез структурной и функциональной схем акусто-магнитной электротехнологии. Функциональная схема системы для защиты от образования отложений на поверхностях трубопроводов (рис.6), включает циркуляционный насос, котел, трубопровод, обратный трубопровод, гидравлически сообщенные между собой блок обработки жидкости (рис.7) и генераторный блок.



1 – циркуляционный насос; 2 – котел; 3 – трубопровод; 4 – обратный трубопровод; 5 – блок обработки жидкости; 6 – генераторный блок.

Рисунок 6 – Функциональная схема системы для защиты от образования отложений на поверхностях трубопроводов

Экспериментальные исследования проведены на воде с общим солесодержанием 1098 мг/л, общей жесткостью воды 5,2мг-эquiv/л, карбонатной жесткостью 2,2мг-эquiv/л. Эффективность безреагентной обработки воды определялась из соотношения:

$$\xi_{\text{рпв}} = \frac{M_0 - M_m}{M_0}, \quad (37)$$

где  $M_0$  - масса накипи, осевшей на поверхности теплообменника за период  $\tau$  без обработки воды;  $M_m$  - масса накипи, осевшей на поверхности теплообменника за период  $\tau$  после обработки воды.

Обоснован тепловой режим работы и оптимальное температурное состояние сердечника АМА. Проведено моделирование физических процессов, происходящих в АМА в среде ELCUT. На первом этапе создана задача типа «Магнитное поле переменных токов» и построена геометрическая модель аппарата. Заданы физические свойства объекта, граничные условия и электрическая цепь.



На втором этапе решена задача типа «Нелинейная задача стационарной теплопроводности». Распределение температуры в акусто-магнитном аппарате, установленном на трубе, представлено на рис. 7. Также была решена задача типа «Задачи теории упругости». При расчете термических деформаций по полю температур, перенесенному из тепловой задачи, начальные деформации учитываются в каждой области (рис. 8), включенной в рассмотрение обеих задач.

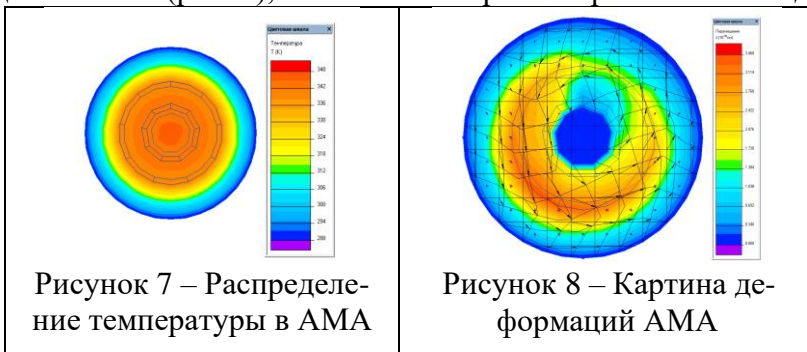


Рисунок 7 – Распределение температуры в АМА

Рисунок 8 – Картина деформаций АМА

Далее решена задача «Магнитное поле переменных токов». Геометрическая модель аппарата представлена в разрезе на рис. 9.

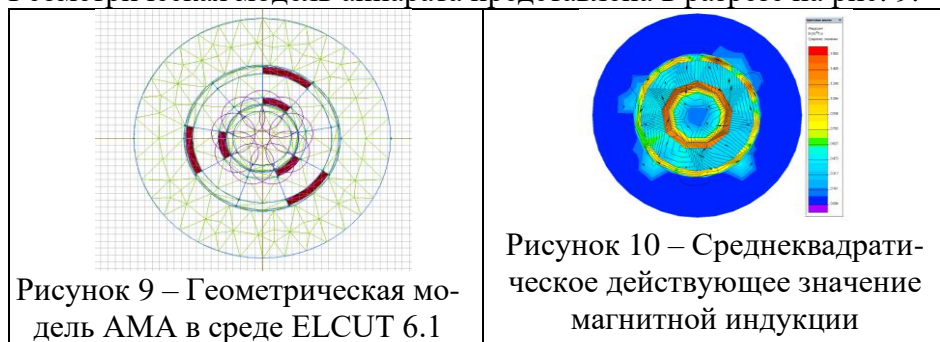


Рисунок 9 – Геометрическая модель АМА в среде ELCUT 6.1

Рисунок 10 – Среднеквадратическое действующее значение магнитной индукции

Результатом моделирования стало среднеквадратическое действующее значение магнитной индукции представлено на рисунке 10. Анализ полученных результатов позволил построить зависимости среднего квадрата напряженности в рабочей зоне модели акусто-магнитного аппарата от частоты и длины рабочей зоны акусто-магнитного аппарата. При оптимизации акустической части акусто-

магнитного аппарата результирующим признаком выбрана сила Лоренца, устремленная на максимум, а изменяемыми параметрами были частота, длина аппарата, сопротивление обмоток, индуктивность обмоток. Результаты моделирования показывают, что максимальная сила Лоренца будет при следующих значениях параметров: длина рабочей области аппарата – 5,19 см; подаваемая частота – 47540 Гц; индуктивность обмотки – 45 мкГн; сопротивление обмотки – 73,26 Ом. Установлено, что температура поверхности акусто-магнитного аппарата составляет 35,84 °С и не зависит от длины рабочей области аппарата.

Исходя из требований к автоматической системе безреагентной обработки жидкости, сформирован список элементов, разработана структурная (рис. 11), функциональная (рис. 12) и принципиальные схемы.

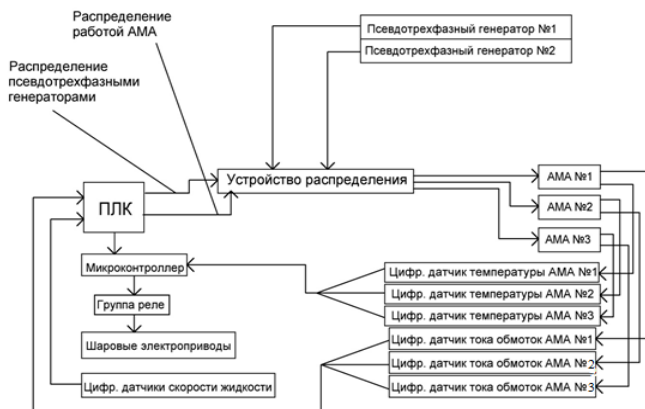


Рисунок 11 – Структурная схема САУ безреагентной обработкой жидкости

Сигналы от датчиков температуры поступают на микроконтроллер, а от датчиков тока на ПЛК. Микроконтроллер воздействует на группу исполнительных механизмов системы. Программа управления выполнена на промышленном контроллере ОВЕН ПЛК150 с блоком расширения входов и выходов контроллера, а в качестве объекта управления выступила математическая модель объекта, реализованная в среде CoDeSys. Надежность разработанной си-

стемы рассчитывалась с помощью статистической модели Миллса.

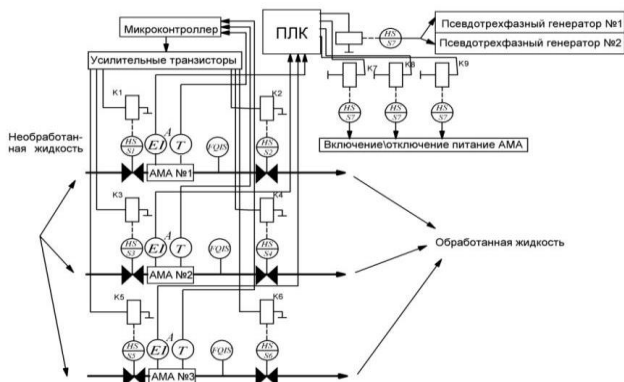


Рисунок 12 – Функциональная схема САУ безреагентной обработкой жидкости

**В четвёртой главе** представлены методики и результаты экспериментальных исследований. Новая методика позволила объединить методы теории подобия и моделирования с методологией планирования экспериментов. Для проведения исследований был изготовлен лабораторный стенд (рис. 13).

Для получения значений результирующего признака использовался кристаллооптический способ. На предметное стекло помещались капли исследуемой воды: геотермальной необработанной и прошедшей обработку акусто-магнитным полем. Использовались микроскопы с увеличением 1000 раз (рис. 14).

Разработана инженерная методика расчёта параметров акусто-магнитных аппаратов. Процесс проектирования был существенно ускорен и облегчен посредством использования опытных данных ранее изготовленных устройств. Исходные данные были приведены к граничным условиям колебания температуры, напряжения, неточности изготовления.

Процесс обработки солевого раствора воды, обработанной физическими полями, можно представить зависимостью:

$$f(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}), \quad (38)$$

где  $P_1 = b$ ; (оптимальная ширина активной части кольца)  $P_2 = a_1$ ;  $P_3 = d_0$ ; (размер отверстия для прохождения челнока);  $P_4 =$

$a_2$  (базисный размер);  $P_5 = i$  (полный ток аппарата)  $P_6 = P_c$  (потери в сердечнике);  $P_7 = U_p$   $P_8 = U_{\text{акт}}$  (падение напряжения на активном сопротивлении обмотки);  $P_9 = \Theta$  (температура акусто-магнитного аппарата);  $P_{10} = r_0$  (активное сопротивление акусто-магнитного аппарата);  $P_{11} = U_c$  (напряжение, подаваемое на излучатель).

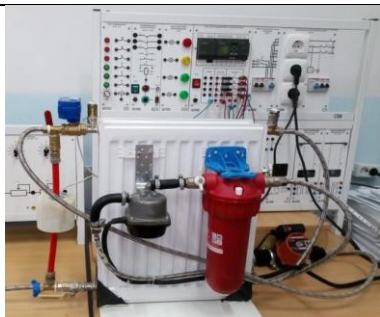
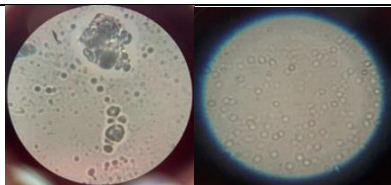


Рисунок 13 – Общий вид экспериментальной установки для определения эффективности АМА



а) б)

Рисунок 14 – Влияние акусто-магнитной обработки на центры кристаллизации: а) необработанная вода; б) вода, обработанная акусто-магнитным полем

Характеристика процесса, связывающего водородный показатель с протекающими процессами в акусто-магнитном поле, представлена установленными критериями подобия:

$$\pi'_{\text{pH}} = f_5(\pi'_1, \pi'_2, \pi'_3, \pi'_4, \pi'_5), \quad (39)$$

где  $\pi'_1, \pi'_2, \pi'_3, \pi'_4, \pi'_5$  равны соответственно  $\pi_{63}, \pi_{65}, \pi_{57}, \pi_{54}, \pi_{60}$ .

Величина  $\pi'_{\text{pH}}$  является целевой функцией. Применяя методы факторного планирования эксперимента, получили критериальное уравнение регрессии вида:

$$\pi'_{\text{pH}} = f_5(\pi'_1, \pi'_2, \pi'_3, \pi'_4, \pi'_5) = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i \pi_i + \sum_{j=2}^5 b_{ij} \pi_i \pi_j \quad (40)$$

Был реализован полный факторный эксперимент  $2^2$ . После получения результатов опытов проведена статистическая обработка результатов. Для определения точечных оценок закона распределения, были исключены грубые погрешности в результатах измерений, для чего использовался критерий Шарлье.

В соответствии с матрицей планирования проведены опыты и определено критериальное уравнение регрессии для процесса акусто-магнитной обработки геотермальных вод в виде:

$$\pi'_{pH} = 0,09 + 0,45\pi'_1 - 0,024\pi'_2 + 0,035\pi'_3 + 0,28\pi'_4 + 0,133\pi'_5. \quad (41)$$

Проведённый статистический анализ результатов эксперимента выявил однородности дисперсии опытов, дисперсии воспроизводимости эксперимента. Средняя относительная ошибка аппроксимации составила  $\bar{e}_{откл} = 0,87\%$ .

Для подготовки к проведению производственных испытаний АМА проведён ряд опытов, для установления зависимости между выбранными после ПРЕСС-процедуры критериями подобия и противонакипным эффектом. Результаты ПРЕСС-модели, имеющие относительную ошибку аппроксимации менее 5%, содержат следующие коэффициенты подобия  $\pi_{62}, \pi_{63}, \pi_{64}, \pi_{65}, \pi_{60}, \pi_{54}, \pi_{57}$ . В итоге получено критериальное уравнение параметров разных типов и конструкций АМА для трубы с внешним диаметром 32 мм:

$$\pi'_{пэ} = f_{п}(\pi_{62}, \pi_{63}, \pi_{64}, \pi_{65}, \pi_{60}, \pi_{54}, \pi_{57}). \quad (42)$$

В ходе проведения экспериментов фиксировались следующие характеристики: скорость движения воды внутри трубы диаметром 32мм ( $v_{32тр} = 1\text{ м/с}$ ); температура обрабатываемой геотермальной воды ( $T_{воды} = 70^\circ\text{C}$ ).

Каждый изготовленный аппарат был установлен на трубу с внутренним диаметром  $D_{32вн} = 26$  мм, а затем с внутренним диаметром  $D_{32вн} = 21,2$  мм. При этом расход воды изменялся соответственно от  $Q_{воды} = 0,53\text{ л/с}$  и до  $Q_{воды} = 0,35\text{ л/с}$ .

Для каждого размера ферритового кольца представлены вычисленные коэффициенты подобия и полученный на опыте результирующий признак – противонакипный эффект.

Критериальное уравнение регрессии для процесса акусто-магнитной обработки геотермальной воды имеет вид:

$$\xi_{вп} = 0,4244 + 0,3581\pi'_{н1} + 0,8797\pi_{н2} + 0,127\pi'_{н3} + 1,6\pi'_{н4} - 1,1325\pi'_{н5} - 3,017\pi'_{н6} - 1,026\pi'_{н7}. \quad (45)$$

Дисперсия воспроизводимости:

$$S_{\text{уст}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\xi_{\text{вп}} - \hat{\xi}_{\text{вп}})^2}{n-k-1} = 0,00002. \quad (46)$$

Вычислены среднее квадратическое отклонение коэффициентов уравнения регрессии  $\beta_i$ , используя элементы  $(X^T X)^{-1}_{i,i}$  обратной матрицы  $(X^T X)^{-1}$ :

$$S_{b_0} = 0,4271, \quad S_{b_1} = 0,2073, \quad S_{b_2} = 0,3213, \quad S_{b_3} = 0,1444, \quad S_{b_4} = 0,4286, \quad S_{b_5} = 0,8145, \quad S_{b_6} = 2,2905, \quad S_{b_7} = 0,4278. \quad (47)$$

В качестве критерия проверки статистической гипотезы:  $H_0: \beta_j = 0$  (коэффициент  $\beta_j$  незначим);  $H_1: \beta_j \neq 0$  (коэффициент  $\beta_j$  значим) принята случайная величина

$$T_{\beta_j} = \frac{\beta_j}{S_{b_j}}. \quad (48)$$

Коэффициент  $\beta_j$  значимо отличается от нуля на уровне значимости  $\alpha$ , если

$$|T_{\beta_j}| > t_{\alpha;m}. \quad (49)$$

Расчитан доверительный интервал коэффициентов регрессии:

$$t_{\alpha;m} = 2,262. \quad (50)$$

$$|T_{\beta_0}| = 0,9937 < 2,262; |T_{\beta_1}| = 1,7276 \leq 2,262; |T_{\beta_2}| = 2,7377 \geq 2,262; |T_{\beta_3}| = 0,8792 \leq 2,262; |T_{\beta_4}| = 3,7339 \geq 2,262; |T_{\beta_5}| = 1,3903 \leq 2,262; |T_{\beta_6}| = 1,3172 \leq 2,262; |T_{\beta_7}| = 2,3995 \geq 2,26. \quad (51)$$

Было принято решение изучить область оптимума посредством отбрасывания незначительных факторов и построения плана полного факторного эксперимента  $2^k$ , сохраняя при этом идею пошагового поиска. Переведя значимые коэффициенты подобия в натуральные величины и проведя анализ размерности, были выявлены физические закономерности явлений посредством функциональных зависимостей между величинами. Выявленные три независимые величины из четырёх критериев подобия полностью описывают процесс, связывающий противонакипный показатель с процессами в акусто-магнитном поле, для трубы с внешним диаметром 32 мм и ферритовом кольце 64x40x9,7мм. Процесс выделения солей из воды, обработанной физическими полями, представлен зависимостью:

$$\xi_{\text{рп}}(P_1, P_2, P_3), \quad (52)$$

где  $P_1 = n; P_2 = f, P_3 = U$ .

Уровни варьирования параметров аппарата:

$$\begin{aligned} (-)P_{n1} &= 410; & (0)P_{n1} &= 815; & (+)P_{n1} &= 1220; \\ (-)P_{n2} &= 25958 \text{ Гц}; & (0)P_{n2} &= 27548 \text{ Гц}; & (+)P_{n2} &= 29138 \text{ Гц}; \\ (-)P_{n3} &= 12 \text{ В}; & (0)P_{n3} &= 24 \text{ В}; & (+)P_{n3} &= 36 \text{ В}. \end{aligned}$$

Кодированные факторы имеют вид:

$$\begin{aligned} P'_{n1} &= \frac{P_{n1} - P_{n1(0)}}{\Delta P_1} = \frac{P_{n1} - 915}{305}; \\ P'_{n2} &= \frac{P_{n2} - P_{n2(0)}}{\Delta P_2} = \frac{P_{n2} - 27500}{1600}; \\ P'_{n3} &= \frac{P_{n3} - P_{n3(0)}}{\Delta P_3} = \frac{P_{n3} - 24}{12}. \end{aligned} \quad (53)$$

Из полученных на опыте результатов сформирован полином  $\xi_{\text{рп}} = 0,92 + 0,01894P'_{n1} + 0,02856P'_{n2} + 0,01056P'_{n3}$ . (54)

Проведённый статистический анализ результатов эксперимента не выявил однородности дисперсии опытов. Значение критерия Фишера:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\xi_{\text{рп}}^{\text{ост}}}^2}{S_{\xi_{\text{рп}}}^2} = \frac{0,00065}{0,00013} = 4,918 \geq F_{(0,05; f_{ad}; f_u)} = 3,84. \quad (55)$$

Полученное уравнение регрессии неадекватно. При реализации матрицы планирования была получена неадекватная модель, и при крутом восхождении получить параметры оптимизации не удалось, после чего было принято решение построить план второго порядка для описания области оптимума. Для этого воспользовались ортогональным планом второго порядка.

Получено следующее уравнение:  $\xi_{\text{вп}} = 0,957 + 0,004P'_{n1} + 0,015P'_{n2} + 0,048P'_{n3} - 0,009P'_{n1}P'_{n2} + 0,005P'_{n1}P'_{n3} + 0,013P'_{n2}P'_{n3} - 0,017(P_{n1}^2) - 0,007(P_{n2}^2) - 0,017(P_{n3}^2)$ . (56)

Для проверки адекватности модели рассчитана дисперсия адекватности и найден критерий Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{0,0044}{0,0024} = 1,83 \leq F_{(0,05; f_{ad}; f_u)} = 6,256. \quad (57)$$

Таким образом, модель адекватна экспериментальным данным. Найден экстремум функции (59) на множестве  $P_m^n$ :

$$P'_{n1} = -0,546, \quad P'_{n2} = 4,122, \quad P'_{n3} = 2,908.$$

Натуральные значения факторов могут быть найдены из

соотношений

$$P_{n1} = P'_{n1} \cdot 305 + 915 = 748,477; P_{n2} = P'_{n2} 1600 + 27500 = 34100; P_{n3} = P'_{n3} \cdot 12 + 24 = 58,9. \quad (58)$$

Для проверки полученных значений глобального максимума процесса акусто-магнитной обработки геотермальной воды было вычислено значение функции по модели (56):

$$\xi_{\text{рп}} = 0,957 + 0,004 \cdot (-0,546) + 0,015 \cdot 4,122 + 0,048 \cdot 2,908 - 0,009 \cdot (-0,546) \cdot 4,122 + 0,005 \cdot (-0,546) \cdot 2,908 + 0,013 \cdot 4,122 \cdot 2,908 - 0,017(-0,546^2) - 0,007(4,122^2) - 0,017(2,908^2) = 1. \quad (59)$$

Был произведен расчет АМА для трубы 159 мм. Для определения эффективности процесса акусто-магнитной обработки геотермальной воды были подставлены коэффициенты подобия в формулу модели и коэффициент противонакипного эффекта составил:

$$\xi_{\text{рп}} = 0,4244 + 0,3581 \cdot 3,556 + 0,8797 \cdot 0,533 + 0,127 \cdot 0,52 + 1,6 \cdot 0,1875 - 1,1325 \cdot 1,137 - 3,017 \cdot 0,0478 - 1,026 \cdot 1,79 = 0,86. \quad (60)$$

Полученное значение эффективности акусто-магнитной обработки геотермальной воды было подтверждено на опыте, после трёх-летней эксплуатации на геотермальной скважине в ЗАО «Радуга». Чаще всего отложение карбоната кальция возникали за задвижками, в местах резкого падения давления и коленах труб. Первоначально, отложения в трубе носят островной характер, затем образуется сплошное кольцо отложений, на которое прикрепляются новые слои (рис. 15). На рис. 16 представлена задвижка, через которую протекала обработанная аппаратом геотермальная вода. Принимая во внимание результаты проведенных согласно методике эксперимента исследований, было принято решение по установке АМА сразу на выходе геотермальной воды из земли (рис. 17).

**В пятой главе** проведены технико-экономические расчеты. Постановка на серийное производство АМА с ежегодным выпуском 1000 шт., позволит предприятию получить чистый дисконтированный доход 9927403 руб., и окупить инвестиции за 0,3 года; при этом цена АМА составит 71685 руб., а ежегодная прибыль – 17428200 руб. Рассчитан ожидаемый интегральный эффект, который составил 3064446 руб.





Рисунок 15 – Разрез трубы, по которой протекали необработанные воды



Рисунок 16 – Задвижка, через которую протекала обработанная вода



Рисунок 17 – Внешний вид АМА с системой автоматике

Рассчитаны экономические показатели при внедрении акусто-магнитного аппарата в сельскохозяйственное производство с учетом факторов неопределенности и риска. Экономия эксплуатационных затрат при внедрении новой безреагентной технологии обработки теплоносителя в геотермальном тепличном комплексе площадью 5 Га составила 525000 руб. Дополнительный годовой экономический эффект от внедрения интенсивной технологии обработки гидропонного раствора в геотермальной теплице по выращиванию огурцов, в расчете на две делянки (0,016 га), составил 395 тыс. руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Итоги выполненных исследований

В заключении приводятся полученные результаты исследований, на основании которых сделаны следующие **научные выводы**:

1. На основе второй и третьей теоремы подобия установлены количество и состав критериев, необходимых для описания процессов, происходящих в акусто-магнитном аппарате. В исследованиях приняты критерии подобия: геометрические, характеризующиеся равенством масштабов геометрических параметров по трем осям координат; электромагнитных полей, создаваемые периодическими переменными токами, которые дополнены критерием гомохронности; электродинамические; тепловых процессов с соблюдением критериев Фруда, Пекле, Нуссельта, Прандтля.

2. На основе подобия процесса реакции нелинейной среды на линей-

ное колебание излучателя получен критерий, учитывающий процессы кавитации жидкости в области аппарата. Система относительных единиц позволяет получить обобщенные критерии геометрических параметров для разных типов и конструкций акусто-магнитных аппаратов. Предложенный метод определения критериев подобия, основанный на полевых методах математической физики, остается справедливым при нелинейности параметров моделируемых систем. Установление связи между числами подобия позволят проектировать и изготавливать акусто-магнитное оборудование различного типоразмера.

3. Получено уравнение, связывающее количество образованной накипи с протекающими процессами в акусто-магнитном поле через критерии подобия  $\xi_{\text{вп}} = f(\pi_{ij})$ . Данную функциональную связь можно применять для расчета количества образованной накипи в различных случаях: так меняя частоту тока и параметры излучателя, можно подобрать такое значение образованной накипи, при котором эффект будет максимальным для данного размера аппарата.

4. Разработана математическая модель основных физических процессов, протекающих в акусто-магнитном аппарате, для установления степени влияния её параметров на степень солеотложения при работе на геотермальном минерализованном теплоносителе. Полученная математическая модель в виде системы уравнений может быть решена с использованием обобщения совокупного опыта обработки аналогов в виде критериальных комплексов параметров. Обоснованы основные параметры с соответствующими расчетными формулами для определения их значений магнитострикционного преобразователя: чувствительность, коэффициент эффективности, сопротивление механических потерь, допустимая амплитуда колебаний, резонансная частота, номинальная электрическая мощность, электромеханический КПД, добротность, входное сопротивление.

5. Разработаны новые безреагентные способы обработки жидкости в тепличном производстве с использованием минерализованных теплоносителей, новизна которых защищена патентами РФ № 2654334, 2641822. Получены функциональные, структурные схемы электро-технологических процессов, принципиальные электрические схемы

отдельных узлов, а также конструктивные решения электротехнологического оборудования, защищенные патентами на изобретение № 2635591, № 2641137, № 2646091, № 2646989.

6. Математическая обработка результатов моделирования показала, что параметры акусто-магнитных аппаратов для предотвращения накипеобразования на внутренних поверхностях теплотехнического оборудования с использованием минерализованных теплоносителей должны быть следующими: при производительности по воде – 1,91 м<sup>3</sup>/ч, резонансная частота – 47348 Гц, номинальная электрическая мощность – 6,19 Вт, электромеханический КПД – 0,75, добротность – 0,012, входное сопротивление – 168,4 кОм. Целевая функция по максимуму силы Лоренца показала, что оптимальными параметрами модели аппарата являются: длина рабочей области – 5,19 см; подаваемая частота – 47540 Гц; индуктивность обмотки – 45 мкГн; сопротивление обмотки – 73,26 Ом.

7. Проведено моделирование в среде ELCUT, в результате которого создана геометрическая модель объекта исследований; заданы его свойства; проведено исследование трёх видов импульсных напряжений и установлена лучшая форма, а именно: меандр; решена нелинейная задача стационарной теплопроводности; определены максимальная и минимальная напряженность в рабочей зоне модели акусто-магнитного аппарата; с целью определения эффективности сигнала импульсной формы, был произведен спектральный анализ гармоник напряженностей магнитного поля; решены задачи теории упругости и магнитного поля переменных токов. Моделирование функционирования проводилось в реальном времени с заданием установочных параметров системы: скорости потока воды – 1 м/с, входной температуры воды – 78,9 °С, начального угла открытия входной заслонки – 90°. Моделирование изменения температуры поверхности аппарата в зависимости от рабочей области показало, что температура поверхности акусто-магнитного аппарата составляет 35,8 °С и не зависит от длины его рабочей области.

8. Разработаны структурная и функциональная схемы акусто-магнитной электротехнологии в гидропонных установках с использованием минерализованных теплоносителей, а также схемы системы

автоматического управления техническим процессом обработки воды. Обоснованы параметры составляющего оборудования: максимальное давление жидкости в системе - 64 атм; мощность электродвигателя привода заслонки – не более 6 Вт; время поворота шарового крана на  $90^\circ$  – 15 с; максимальная температура жидкости  $+100^\circ\text{C}$ . Программирование велось на промышленном контроллере ОВЕН ПЛК 150 с блоком расширения входов и выходов, в качестве объекта управления выступала математическая модель объекта, реализованная в среде CoDeSys. Моделирование программы управления выполнялось с шагом квантования 0,12 с. Надежность разработанной системы рассчитывалась с помощью статистической модели Миллса и составила 0,93.

9. Модернизирована методика планирования эксперимента с использованием обобщённых факторов и критериев подобия. Отличительной особенностью методики является наличие матрицы планирования с указанием не только значений критериев подобия, но и значений параметров, соответствующих данному численному значению. Шаг отклонения критериев подобия задаётся с помощью вариации параметров, входящих в них.

10. Изготовлен лабораторный стенд и макетные образцы акусто-магнитного аппарата. Проведена статистическая обработка экспериментальных данных для определения точечных оценок закона распределения с использованием критерия Шарлье. Получены уравнения регрессии, позволяющие определить рациональные режимы работы акусто-магнитного аппарата. Проверка гипотезы об адекватности модели показала, что средняя относительная ошибка аппроксимации равна 2,93%. Для организации планирования эксперимента использовались восемь акусто-магнитных аппаратов, имеющих размеры ферритовых колец входящих в интервал варьирования габаритных коэффициентов подобия. Для каждого акусто-магнитного аппарата проведены опыты по определению противонакипного эффекта, и вычислены все коэффициенты подобия. Анализ показал, что адекватную модель дают следующие коэффициенты подобия  $\pi_{62}, \pi_{63}, \pi_{64}, \pi_{65}, \pi_{60}, \pi_{54}, \pi_{57}$ . В результате оптимизации параметров аппарата получены следующие значения:  $n=748$  витков;  $f=34100$  Гц;

U=59 В.

11. Сопоставление результатов математического и физического моделирования основных физических процессов, протекающих в акусто-магнитных аппаратах, показали следующее: по электрическим характеристикам относительная ошибка не превышала 5%; по магнитным характеристикам – в центре рабочей зоны отклонение от среднего значения магнитной индукции составило 2%, по тепловым и акустическим – погрешность не превышала 10%.

12. По предлагаемой методике и в соответствии с теорией подобия был изготовлен аппарат для обработки геотермальной воды для реального объекта. Исходными данными были следующие: температура окружающей среды (воздуха) не более 35 °С; диаметр подающей трубы 159 мм; температура геотермальной воды 85 °С; режим работы постоянный; производительность по воде 90 м<sup>3</sup>/час, давление 4 атм. Основные характеристики аппарата: установлен на трубе диаметром 75 мм, скорость жидкости в трубе 0,41 м/с, в излучателе использовано ферритовое кольцо М2000НМ, 125x80x12, резонансная частота колебаний 14782 Гц, число витков обмотки одной фазы – 208, диаметр провода обмотки – 0,67 мм, ток – 1А, потребляемая мощность – около 150 Вт, масса магнитопровода – 0,472 кг, коэффициент противонакипного эффекта - 0,99.

13. Проведенные в 2016-2018 гг. на геотермальных источниках ЗАО «Радуга» (Майкопское месторождение) экспериментальные исследования по защите металла оборудования от коррозии и его отмывке от солеотложения показали, что акусто-магнитная обработка воды позволяет не только эффективно защитить металл от коррозии, но и удалять уже имеющиеся отложения солей и продуктов коррозии в системе теплоснабжения. Акусто-магнитный аппарат также был установлен в систему подачи гидропонного раствора и показал следующую эффективность: на экспериментальных участках урожайность выращиваемых сортов огурцов на 20 % превысила урожайность на контрольных участках; важный показатель плодоношения, длина междоузлий, увеличился на 25 % на экспериментальных участках.

14. На основании сравнения показателей для различных аппаратов

безреагентной обработки жидкости можно сделать вывод о том, что разработанная конструкция акусто-магнитного аппарата при одной и той же производительности имеет энергоемкость процесса на два порядка ниже по сравнению с оборудованием магнитной обработки. Сделанный вывод подтверждает научную гипотезу о том, что одновременное воздействие акустическим и магнитным полем на геотермальную воду позволяет снизить энергопотребление электротехнологической установки и улучшить эксплуатационные характеристики.

15. Расчет экономической эффективности мелкосерийного производства акусто-магнитных аппаратов показал, что при цене устройства 71685 рублей и ежегодной реализации 1000 штук годовая прибыль составит 17 млн. руб., и чистый дисконтированный доход за три года составит 9,9 млн. руб., срок окупаемости капиталовложений – 0,3 года. Экономия эксплуатационных затрат при внедрении новой безреагентной технологии обработки теплоносителя в геотермальном тепличном комплексе площадью 5 Га составила 525000 руб. Дополнительный годовой экономический эффект от внедрения интенсивной технологии обработки гидропонного раствора в геотермальной теплице по выращиванию огурцов, в расчете на две делянки (0,016 га), составил 395 тыс. руб.

**Рекомендации производству.** Организация мелкосерийного производства акусто-магнитных аппаратов позволит получить существенный доход предприятию-производителю. Данным предприятиям нужно разработать широкую номенклатуру аппаратов на различные размеры труб и разную производительность по теплоносителю. Внедрение в тепличных комплексах с использованием геотермального низкопотенциального тепла, акусто-магнитной технологии обработки теплоносителя позволит значительно сократить эксплуатационные затраты на замену труб, очистку от шлама труб, закупку реагентов, удаление шлама в теплообменниках и т.д. Службам эксплуатации теплотехнического оборудования в геотермальных теплицах, после установки новой технологии, рекомендуется изменить технологические схемы с целью их упрощения и установки другого типа шламоуловителей. В тепличных комплексах с использованием

геотермальных вод целесообразно внедрять предлагаемую технологию для обработки гидропонного раствора, что приведёт к повышению урожайности сельскохозяйственных культур и повышению их качества. В таких теплицах следует изменить технологическую схему подготовки гидропонного раствора, введя оборудование для акусто-магнитной обработки.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** После проведения теоретических и экспериментальных исследований можно разработать акусто-магнитную технологию обработки не только геотермальных вод, но и вод из артезианских скважин. Следует провести исследования по комбинированным обработкам: акусто-магнитной с использованием гидравлического удара, электролиза и т.д. Эффективность применения акусто-магнитной обработки гидропонного раствора необходимо проверить на других сельскохозяйственных культурах: томатах, грибах, клубнике, перцах, баклажанах, капусте и т.д. Нужно повысить уровень автоматизации электротехнологического процесса акусто-магнитной обработки в части интегрирования в общую информационно-управляющую систему тепличного комплекса, архивации данных, создания программных баз при различных исходных данных. После отработки акусто-магнитных аппаратов в реальном производстве можно приступить к выпуску более крупных партий с широким спектром по массогабаритным показателям.

#### **Основные положения диссертации опубликованы:**

##### ***Издания, индексируемые в Scopus и Web of Science:***

1. Korzhakov, A.V. Identification of most effective form of pulse voltage supply of electric windings of acoustic magnetic device processing liquid in water pipes / Alexey Korzhakov, Sergei Oskin // 17<sup>th</sup> International Scientific Conference Engineering for Rural Development 23-25.05.2018. Jelgava, LATVIA.
2. Korzhakov, A.V. Investigation of influence of pulse voltage form on change of voltage gradient of magnetic field in working zone of acoustic and magnetic device model / Alexey Korzhakov, Sergei Oskin // Proceedings – 2018. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2018.

3. Korzhakov, A.V. Automatization of geothermal water acoustic and magnetic treatment process in hydroponic greenhouse heating system / Valery Korzhakov, Alexey Korzhakov, Svetlana Korzhakova // International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018.
4. Korzhakov, A.V. Acoustic and magnetic treatment process automatization in hydroponic solution preparation system / Alexey Korzhakov, Sergei Oskin, Svetlana Korzhakova // Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019.
5. Korzhakov, A.V. Technique of creating new constructions of acoustic and magnetic devices based on theory of similarity as development of theory of experiment / Alexey Korzhakov, Sergei Oskin, Svetlana Korzhakova // 18<sup>th</sup> International Scientific Conference Engineering for Rural Development 22-24.05.2019 Jelgava, LATVIA.
6. Korzhakov, A.V. Method of power optimization in geothermal heating system by solving interrelated problems of acoustic and magnetic device model / Valery Korzhakov, Alexey Korzhakov, Svetlana Korzhakova // 18<sup>th</sup> International Scientific Conference Engineering for Rural Development 22-24.05.2019 Jelgava, LATVIA.
7. Korzhakov, A.V. Optimization of the Process of Acoustic and Magnetic Geothermal Water Treatment Through Simulation in CoDeSys / A.V. Korzhakov, Korzhakov V.E., Korzhakova S.A. (2020). In: Radionov A., Karandaev A. (eds) Advances in Automation. RusAutoCon 2019. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 641. Springer, Cham.
8. Korzhakov, A.V. Application of reagent-free methods to eliminate the causes of salt deposition in thermal systems on geothermal sources. / Alexey Korzhakov, Sergei Oskin / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
9. Korzhakov, A.V. Results of experimental studies of hydroponic solution processing with acoustic-magnetic field effect to cucumber yield in hydroponic greenhouses / Alexey Korzhakov, Sergei Oskin, Svetlana Korzhakova // 19<sup>th</sup> International Scientific Conference Engineering for Rural Development 20-22.05.2020 Jelgava, LATVIA.
10. Korzhakov, A.V. Methods for determining optimal characteristics of acoustic-magnetic devices installed on greenhouse geother-



mal heating system pipes of various diameters/ Valery Korzhakov, Alexey Korzhakov, Svetlana Korzhakova // 19<sup>th</sup> International Scientific Conference Engineering for Rural Development 20-22.05.2020 Jelgava, LATVIA.

11. Korzhakov, A.V. Verification of method for calculating parameters of acoustic-magnetic devices installed in heat supply system of greenhouse complex / Stefan Onishchenko, Artem Avdzhiyan, Svetlana Korzhakova, Alexey Korzhakov // 19<sup>th</sup> International Scientific Conference Engineering for Rural Development 20-22.05.2020 Jelgava, LATVIA.

12. Korzhakov, A.V. Research of the Possibility of Automation of Geothermal Heat Supply of Greenhouses with a Surface Heat Exchanger / A.V. Korzhakov, S.A. Korzhakova, V.E. Korzhakov// International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020.

***Издания, рекомендованные ВАК Министерства науки и высшего образования РФ:***

13. Коржаков, А.В. Реализация метода оптимизации процесса предварительной акусто-магнитной обработки технической воды теплоагрегатов / А.В. Коржаков, В.Е. Коржаков // Ежеквартальный реферируемый научный журнал «Вестник АГУ». – Номер: 1 (16), апрель 2005 г.– С. 12-19.

14. Коржаков, А.В. Идентификация и синтез системы акусто-магнитной обработки жидкости // Ежеквартальный реферируемый научный журнал «Вестник АГУ». – Номер: 4 (28), апрель 2007 г.–С. 78-86.

15. Коржаков, А.В. Методика расчета параметров акусто-магнитного аппарата обработки жидкости / А.В. Коржаков, С.А. Коржакова // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия «Естественные и технические науки». – Выпуск 1(133), 2014.– С. 131-136.

16. Коржаков, А.В. Рассмотрение критериев подобия для создания новых конструкций акусто-магнитных аппаратов, предназначенных для использования в гидропонных установках / А.В. Коржаков, С.А. Коржакова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный

журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – №05(099). – IDA [article ID]: 0991405054. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2014/05/pdf/54.pdf>.

17. Коржаков, А.В. Результаты экспериментальных исследований влияния акусто-магнитного поля на электропроводность и водородный показатель гидропонного раствора / А.В. Коржаков, С.А. Коржакова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – №06(110). IDA [article ID]:1101506035. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2015/06/35>.

18. Коржаков, А.В. Анализ математических уравнений, описывающих акустические и электромагнитные поля акусто-магнитного аппарата, и установление критериев подобия для создания новых конструкций акусто-магнитных аппаратов, предназначенных для использования в гидропонных установках/ А.В. Коржаков, С.А. Коржакова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс].–Краснодар: КубГАУ, 2016. – №03(117). –IDA [article ID]:1171603031.– Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/03/pdf/31.pdf>.

19. Коржаков, А.В. Предупреждение коррозии и солеотложения в системах геотермального теплоснабжения / А.В. Коржаков, С.В. Оськин // Сельский механизатор. – №7. – 2018. – Стр.38-39.

20. Коржаков, А.В. Безреагентные способы обработки гидропонного раствора при капельном поливе / А.В. Коржаков, С.В. Оськин // Сельский механизатор. – №2. – 2020. – Стр.18-19.

21. Коржаков, А.В. Образование солеотложений в геотермальных системах теплоснабжения и способы их удаления / А.В. Коржаков, С.В. Оськин // Сельский механизатор. – №7. – 2020. – Стр.17-19,27.

22. Коржаков, А.В. Безреагентная обработка геотермальной воды в системе теплоснабжения / А.В. Коржаков, С.В. Оськин //

Сельский механизатор. – №5-6. – 2020. – Стр.32-34,38.

23. Коржаков, А.В. Результаты экспериментальных исследований эффективности процесса акусто-магнитной обработки жидкости с помощью кристаллооптического способа / А.В. Коржаков, С.А. Коржакова // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия «Естественные и технические науки». – Выпуск 1. – 2020. – С. 69-74.

*Публикации по теме диссертации:*

24. Коржаков, А.В. Исследования эффективности акусто-магнитной обработки водных систем / В.И. Лойко, А.В. Коржаков // Политематический сетевой электронный Научный журнал Кубанского аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, №5 (03), апрель, 2004 (Дата выпуска: 05.04.2004). Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2004/03/07/>.

25. Коржаков, А.В. Методика системного анализа прикладных процессов системы акусто-магнитной обработки жидкости / А.В. Коржаков, В.И. Лойко, С.А. Коржакова // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ 2005.-№1 (01). – Режим доступа: <http://www.ej.kubagro.ru/2005/20/01/p02.asp>.

26. Коржаков, А.В. Управление экологической эффективностью акусто-магнитной обработки двигателей внутреннего сгорания автомобилей / А.В. Коржаков, В.Е. Коржаков, С.А. Коржакова // В сб. докладов Международной научно-технической конференции «ИКИ-2003» г. Барнаул, 19-21 мая 2003г.

27. Коржаков, А.В. Экспериментальная факторная модель процесса акусто-магнитной обработки топлива / В.И. Лойко, А.В. Коржаков // Политематический сетевой электронный Научный журнал Кубанского аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, №2 (02), ноябрь, 2003 (Дата выпуска: 19.11.2003). Режим доступа: <http://ej.Kubagro/ru/archiue/asp?>.

28. Коржаков, А.В. Исследование эффективности акусто-магнитной обработки жидкого топлива / А.В. Коржаков, В.И. Лойко // Политематический сетевой электронный Научный журнал

Кубанского аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, №4 (02), февраль, 2004 (Дата выпуска: 20.02.2004). Режим доступа: <http://ej.Kubagro.ru/archiue/asp?>

29. Коржаков, А.В. Экспериментальная факторная модель процесса акусто-магнитной обработки топлива // Материалы научной конференции молодых ученых АГУ (6 февраля 2004 года) – Майкоп: Изд-во АГУ, 2004. – Том 2.

30. Коржаков, А.В. Результаты экспериментальных исследований влияния акусто-магнитного поля на электропроводность и водородный показатель гидропонного раствора / А.В. Коржаков, С.А. Коржакова // XIV Международная научно-практическая конференция «Современные концепции научных исследований» Часть 3. Технические науки. Москва 29-30 мая, 2015. С. 80-84.

31. Korzhakov, A.V. The results of experimental research of influence of acoustic and magnetic field on electroconductivity and PH-value of hydroponic solution for capsicum annuum / Korzhakova S.A. // Science and Education [Text]: Materials of the X International research and practice conference. Vol.I.December 9-10, 2015. Munich, Germany, 2015.– Munich: Publishing office Vela Verlag Waldkraiburg, 2017. – pp: 68-74.

32. Korzhakov, A.V. Determination of similarity criteria for the creation of new constructions of acoustic magnetic devices designed for use in hydroponic systems / Korzhakova S.A. // Science and Education [Text]: Materials of the XI International research and practice conference. April 6-7, 2016.– Vol.I. Munich, Germany, 2016.

33. Korzhakov, A.V. The development of the methods of selecting parameters of models of similar devices of acoustic and magnetic treatment of liquid / Korzhakova S.A. // Science and Education [Text]: materials of the XVI international research and practice conference, Munich, Germany. June 27th–28th, 2017.– Munich: Publishing office Vela Verlag Waldkraiburg, 2017. – pp: 132.

34. Korzhakov, A.V. The technique of creating new constructions of acoustic and magnetic devices based on the theory of similarity as

a development of the theory of experiment / Valery Korzhakov, Alexey Korzhakov, Svetlana Korzhakova // 2018 International Conference on Industrial Engineering. <http://icie-rus.org/icie2018-rus.html>.

35. Korzhakov, A.V. Investigation of the influence of the pulse voltage form on the change of the voltage gradient of the magnetic field in the working zone of the acoustic and magnetic device model / A.V. Korzhakov, V.E. Korzhakov, M.S. Sokolov // European Science and Technology [Text] : materials of the XVII international research and practice conference, Munich. Germany.– June 7th – 8th, 2017.– Munich: Publishing office Vela Verlag Waldkraiburg, 2017. – 244 p.

36. Оськин, С.В. Применение акусто-магнитных устройств в системах теплоснабжения тепличных комплексов С.В. Оськин, А.В. Коржаков, В.И. Лойко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2020. – №03(157). С. 334–345.– IDA [article ID]: 1572003025. – Режим доступа: <http://2020/03/pdf/25.pdf>.

#### ***Монографии:***

37. Оськин, С.В. Рекомендации по установке и эксплуатации акусто-магнитных аппаратов на теплотехническом оборудовании: монография. / С.В. Оськин, А.В. Коржаков. – Краснодар: Изд-во ООО «Крон», 2019.– 88 с.

#### ***Патенты:***

38. Коржаков, А.В. Устройство для безреагентной обработки жидкости / А.В. Коржаков, В.Е. Коржаков, Н.П. Кириллов // Авторские свидетельства на изобретения БИ № 13, 1992. Авторское свидетельство № 1724594.

39. Коржаков, В.Е., Крамаренко Б.Д., Плешаков В.В., Коржаков А.В. Устройство для безреагентной обработки жидкости / В.Е. Коржаков, Б.Д. Крамаренко. В.В. Плешаков, А.В. Коржаков // Авторские свидетельства на изобретения БИ № 38, 1989. Авторское свидетельство № 1514726.

40. Коржаков, А.В., Коржаков В.Е., Оськин С.В. Устройство для защиты от образования отложений на поверхностях трубопроводов систем теплоснабжения / А.В. Коржаков, В.Е. Коржаков, С.В. Оськин // Патент РФ № 2635591, С1 С23F 15/00 Заявка 2017100470, 09.01.2017. Оpubл. 14.11.2017. Бюл. №32.
41. Коржаков, А.В. Способ обработки гидропонного питательного раствора / А.В. Коржаков, В.Е. Коржаков, С.В. Оськин // Патент РФ № 2654334, С1 А01G 31/00 Заявка: 2017101051, 11.01.2017 Опубликовано: 17.05.2018 Бюл. № 14.
42. Коржаков, А.В. Способ безреагентной обработки воды / А.В. Коржаков, В.Е. Коржаков, С.В. Оськин // Патент РФ №2641822, С1 С02F 1/36. Заявка 2017100213, 09.01.2017. Оpubл. 22.01.2018. Бюл. №3.
43. Коржаков, А.В. Устройство для безреагентной обработки воды / А.В. Коржаков, В.Е. Коржаков, С.В. Оськин // Патент РФ №2641137, С1 С02F 1/36; С02F 1/484. Заявка 2017100210 09.01.2017. Оpubл. 16.01.2018. Бюл. №2.
44. Коржаков, А.В. Устройство для обработки гидропонного питательного раствора / А.В. Коржаков, В.Е. Коржаков, С.В. Оськин // Патент РФ №2646091, С1 А01G 31/00. Заявка 2017101049, 11.01.2017. Оpubл. 01.03.2018. Бюл. №7.

Подписано в печать 16.12.2020 г.  
Формат 60 × 84 16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура  
«Таймс».  
Усл. печ. л. – 2. Тираж 100 экз. Заказ № 33.  
Отпечатано в типографии ООО «Крон»  
350044, г. Краснодар, пр. Чекистов, 20.