

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кубанский государственный аграрный университет
имени И. Т. Трубилина»

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

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор,
Оськин Сергей Владимирович

Краснодар – 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ СОЛЕОТЛОЖЕНИЙ В ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ В ГИДРОПОННЫХ ТЕПЛИЦАХ	15
1.1 Конструкции и основные характеристики теплиц.....	15
1.2 Методы и оборудование для снижения солеотложения в теплотехнических системах.....	26
1.3 Существующие физические методы и оборудование для воздействия на солеотложения	47
1.4 Анализ воздействия магнитных и других физических полей на воду и биосистемы.....	53
1.5 Анализ математических уравнений, описывающих электромагнитные поля	62
1.6 Анализ математических уравнений, описывающих акустические поля	70
1.7 Выводы и задачи исследования.....	80
2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ И ПОЛУЧЕНИЕ НЕОБХОДИМЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АКУСТО-МАГНИТНОГО АППАРАТА.....	83
2.1 Формулировка математической задачи моделирования акусто-магнитного аппарата и установление критериев подобия.....	83
2.2 Получение математической модели процессов, протекающих в акусто-магнитном аппарате.....	116
2.3 Выводы	138
3 СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УСТРОЙСТВЕ.....	141
3.1 Разработка новых способов обработки жидкостей с получением структурных и функциональных схем акусто-магнитной электротехнологии	141

3.2 Выбор акустических параметров при проектировании ультразвуковой части аппарата	149
3.3 Выбор электрических и магнитных параметров при проектировании магнитной части аппарата.....	152
3.4 Выбор теплового режима работы акусто-магнитного аппарата	157
3.5 Определение оптимального температурного режима работы акусто-магнитного аппарата.....	166
3.6 Моделирование физических процессов, происходящих в акусто-магнитном аппарате в среде ELCUT.....	172
3.7 Расчет элементов и устройств системы автоматики акусто-магнитного аппарата.....	180
3.8 Выводы	201
4 МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	204
4.1 Разработка общей методики выбора параметров моделей подобных аппаратов и модернизация методики планирования экспериментов с использованием критериев подобия.....	204
4.2 Изготовление лабораторного стенда и описание методики экспериментальных исследований	215
4.3 Разработка инженерной методики расчета параметров акусто-магнитных аппаратов	224
4.4 Результаты полевого эксперимента в тепличном комплексе.....	252
4.5 Сравнение результатов математического и физического экспериментов	257
4.6 Выводы	266
5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТО-МАГНИТНОГО АППАРАТА В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.....	270
5.1 Расчет затрат на стадии исследования и разработки.....	270
5.2 Определение цены аппарата и дисконтированного дохода при	

организации мелкосерийного производства.....	275
5.3. Экономические показатели при внедрении акусто-магнитного аппарата в сельскохозяйственное производство с учетом факторов неопределенности и риска	284
5.4 Выводы	289
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	290
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	297
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	318

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В последние годы во всем мире на фоне полуголодного существования части населения Земли не ослабевает интерес к гидропонике, позволяющей выращивать растения без почвы, на искусственных питательных растворах. Данный способ выращивания растений позволяет получить высокие и устойчивые результаты при снижении себестоимости продукции. Этот метод, представлявший ранее чисто научный интерес, в настоящее время нашёл широкое применение в мире. В растениеводстве защищенного грунта этот метод открывает возможности для механизации и автоматизации производственных процессов. Выращивание растений гидропонным методом особенно эффективно в районах крайнего Севера, пустынных и горных районах, в крупных тепличных хозяйствах, расположенных в зоне больших городов.

В связи с быстрым развитием и внедрением гидропоники большое значение имеет обобщение результатов научных исследований и передовой опыт фирм, занимающихся выращиванием растений гидропонным методом, и предложение на основе опытных разработок научно обоснованных новых методов выращивания растений без почвы. Агротехнология выращивания овощей в теплице требует точного поддержания температурного режима. Для теплоснабжения тепличных комплексов используются различные источники тепловой энергии.

Россия располагает не только большими запасами органического топлива, но и геотермальными ресурсами, энергия которых на порядок превышает весь потенциал органического топлива. Использование тепла Земли в России может составить до 10% в общем балансе теплоснабжения. На территории России разведано 66 геотермальных месторождений с производительностью более 240 тыс.м³/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 [33]. Тепловой потен-

циал 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 экономическую эффективность термальных вод, 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. На поверхности, при дальнейшем снижении давления, пресыщенный раствор выпадает в осадок. 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.

Наблюдения за процессами отложения карбоната кальция в геотермальной системе на месторождениях вод различного химического состава, минерализации, за температурой и давлением на устье скважины, наличием взвешенных частиц показывают, что отложение карбоната кальция для вод различных скважин происходит в строго определенном месте по трассе транспортирования воды. Это место при прочих равных условиях характеризуется значениями давления и температуры, которые для различных вод неодинаковы. Чаще всего отложения карбоната кальция возникали за задвижками, в местах резкого падения давления и в коленах труб [8].

Для предупреждения отложений из карбоната кальция значение рН чаще всего поддерживается на уровне 6,5–7,5, обеспечивающем стабильность воды, за счет добавления в воду серной кислоты. Применяемые реагентные методы не позволяют предотвращать накипеобразование, а работают по факту образования накипи. Для повышения рентабельности работы тепличных комплексов Республики Адыгея необходимо провести научно-исследовательскую работу по приме-

нению безреагентных методов обработки геотермальных вод. Арсенал безреагентных методов очень широк, у каждой технологии есть свои преимущества и недостатки. Но практически все методы имеют высокие энергетические и эксплуатационные затраты.

Для устранения указанных недостатков необходимо создать устройство, которое при низких эксплуатационных затратах имеет высокие показатели устранения накипи на стенках теплотехнического оборудования. разработка нового устройства невозможно без создания новой теории исследования и конструирования, суть которых заключается в том, что в рабочем зазоре предлагается одновременно использовать акустическое и магнитное поле. Ультразвук поступает в систему волнообразно в обе стороны от аппарата. Эффективность акустической энергии проявляется в предотвращении формирования первичных кристаллов на трубах. Магнитная обработка заключается в том, что под действием вращающегося магнитного поля ферромагнитные примеси воды укрупняются и адсорбируют на своей поверхности карбонатные кристаллы, в результате чего образование твердой фазы CaCO_3 происходит в толще воды, а не на поверхности труб.

С помощью акусто-магнитной обработки имеется возможность существенно замедлить образование неорганических отложений, в несколько раз снизить скорость внутренней коррозии без остановок работы системы, без вмешательства в работу системы, без реагентов и вреда для экологии. Устройства соответствующей мощности монтируются поверх трубопровода. Исследования выполнялись в соответствии с планом НИР Кубанского ГАУ №ГР АААА-А16-116021110071-1 (2016-2020 гг.).

Степень разработанности темы.

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 имени академика И. Т. Трубилина в области магнитной обработки жидкости работу проводили такие авторы, как: Н.И. Богатырев, Н.И. Катрич, А.В. Лопатченко, И.А. Потапенко, Г.И. Третьяков, Н.Н. Курзин, О.В. Вронский, В.К. Андрейчук, И.С. Белюченко, Р.Д. Тлиш, А.Г. Демьянченко, В.А. Белашов, А.С. Зотов, что подтверждено патентами Российской Федерации [15,16,17, 118-128]. 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. [32,56,130,131].

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.

Научная гипотеза: создание методологическо-теоретической базы по ком-

плексной 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 теплич-

ном 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.

Научная новизна работы:

- 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 магнитострикционного 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-маг-

нитного 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 трудоёмкостью 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 гидропонного 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 произ-

водственные 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 электротехнологии 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 ра-

- боты 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 солевых отложений 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-коммунального хозяйства Краснодарского края.

Основные положения диссертационной работы доложены и одобрены на: XIV Международной научно-практической конференции «Современные концепции научных исследований» (Москва 29-30 мая, 2015); X Международной научно-практической конференции "Наука и образование" (9-10 декабря, 2015. Мюнхен, Германия); XI Международной научно-практической конференции "Наука и образование" (6-7 апреля, 2016. г. Мюнхен, Германия); XVI Международной научно-практической конференции "Наука и образование" (27-28 июня 2017 г. Мюнхен, Германия); XVII Международной научно-практической конференции "Европейская наука и технологии"(7-8 июня, 2017. г. Мюнхен, Германия); Международной научно-технической конференции «Автоматизация. Русавтокон» (9-16 сентября 2018); Международной научно-технической конференции «Автоматизация. Русавтокон» (8-14 сентября 2019); XVII Международной научной конференции

«Инженерное обеспечение развития сельских районов» (23-25 мая 2018, г. Елгава, Латвия); XVIII Международной научной конференции «Инженерное обеспечение развития сельских районов» (22-24 мая 2019, г. Елгава, Латвия); XIX Международной научной конференции «Инженерное обеспечение развития сельских районов» (20-22 мая 2020, г. Елгава, Латвия); Международной научно-технической конференции «Автоматизация. Русавтокон» (6-12 сентября 2020).

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 Минобрнауки РФ, 1 монографии, 7 патентах на изобретения и способы.

1 СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ СОЛЕОТЛОЖЕНИЙ В ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ В ГИДРОПОННЫХ ТЕПЛИЦАХ

1.1 Конструкции и основные характеристики теплиц

Для выращивания теплолюбивых культур и получения ранней продукции зеленых и пряных растений используют агротехнологии защищенного грунта, т.е. теплицы (остекленные, на солнечном и техническом обогреве, пленочные), разнообразные тоннели, утепленный грунт с применением различного укрывного материала. Эти агротехнологии позволяют пролонгировать период сбора урожая, появляется возможность раннего высаживания рассады и посева. В защищенном грунте обеспечивается благоприятный искусственный климат, не зависящий от состояния погоды и времени года [64].

В соответствии с технологическими требованиями теплицы классифицируют на различных основаниях классификации:

- по назначению (овощные, цветочные, цитрусовые, рассадные и рассадно-овощные);
- по периоду эксплуатации (зимние, которые эксплуатируют в течение всего года с консервацией в южной зоне летом; весенние, которые эксплуатируют весной, летом и осенью);
- по способу выращивания (почвенные, осуществляющие выращивание овощных культур на почвогрунтах, и беспочвенные (гидропонные и аэропонные), в которых выращивание происходит на искусственных субстратах).

В соответствии со строительными требованиями теплицы разделяют:

- по количеству пролетов и скатов (многопролетные (блочные) и однопролетные (ангарные) (рисунок 1.1), одно-, двух- и многоскатные с равными и неравными скатами);
- по типу несущих конструкций (каркасные (стоечно-балочные, рамные, арочные (рисунок 1.2), вантовые) и бескаркасные (воздухоопорные, панель-

ные));

- по материалу ограждений (остекленные (листовое и профильное стекло) и пластмассовые (полимерные пленки, жесткие пластики)) [143].



Рисунок 1.1 – Внешний вид теплицы ангарного типа [202]

В соответствии со способами компоновки выделяют следующие типы:

- отдельно стоящие (павильонного типа);
- объединенные в укрупненные блоки (компактного типа).

В соответствии со способами расположения подразделяют на:

- одноэтажные (одноярусные);
- башенного типа (многоярусные);
- надстройки на крыше;
- пристройки у стен других сооружений [143].

Конструкции теплиц основаны на сборных элементах заводского изготовления, причём основные несущие конструкции современных каркасных теплиц с остекленными ограждениями изготавливают из металла с антикоррозийной защитой. В конструкциях пленочных теплиц также используют древесину (применяют и бескаркасные технологии строительства теплиц). В качестве фундаментов теплиц применяют сборные столбчатые, для блочных теплиц – короткосвайные, винтовые.

По нормам коэффициент затенения теплиц несущими конструкциями (ра-

мами, арками, прогонами и др.) допустим в диапазоне не более 0,25 при ограждении из стекла и не более 0,15 для конструкций из светопрозрачных жестких пластмасс. Ограждения выполняют из светопрозрачных материалов с высоким уровнем прохождения видимых и ультрафиолетовых лучей и низким уровнем для инфракрасного участка спектра. Рекомендуется использовать цельные листы стекла шириной не менее 60 см и большие полотнища эластичной пленки при регулируемом натяжении и безгвоздевом креплении [143].



Рисунок 1.2 – Внешний вид теплицы арочного типа [202]

Теплицы оборудуют системами отопления воздуха, вентиляции, орошения (полива), увлажнения и подкормки растений, а также системами дренажа, искусственного затенения, подачи углекислого газа, искусственного облучения с автоматическим управлением. Отопление промышленных теплиц играет самую важную роль. Существует несколько способов, с помощью которых можно отапливать теплицы в зимнее время года:

- использование солнечного тепла – это достаточно простой и распространенный способ, когда теплица нагревается в дневное время при помощи солнечных лучей;
- способ биологического обогрева основывается на использовании тепла, вырабатываемого специальными живыми микроорганизмами;
- способ основанный на использовании тепла, вырабатываемого тепловыми сетями, ТЭЦ и котельными на основе газа, электроэнергии (калориферные

устройства, электронагреватели, а также конвекционные системы);

- способ, предполагающий использование тепла геотермальных вод и отработанного тепла промышленных предприятий.

Для обогрева 1 га теплиц в средней зоне страны требуется 2,5 тысячи тонн условного топлива в год [134]. В мире широко распространено применение геотермальных источников для обогрева теплиц.

Геотермальная энергия быстрыми темпами осваивается за рубежом. В 2000г. геотермальные электрические станции (ГеоЭС) работали в 21 стране с суммарной установленной мощностью 7974 МВт, а мощность установок прямого использования геотермального тепла в 56 странах составляла 16210 МВт, что на 81% выше уровня 1995г. [8]. В 2005 г. ГеоЭС работают в 24 странах с суммарной мощностью 8911 МВт, а суммарная тепловая мощность установок прямого использования тепла достигла 28000 МВт [8]. Наиболее широко термальные воды используют в США, Исландии, Италии, Франции, Филиппинах, Японии, Новой Зеландии, Мексике, Никарагуа, Болгарии, Венгрии, Турции, Китае и других странах. Геотермальная энергетика США занимает первое место в мире, установленная мощность ГеоЭС составляет 2544 МВт. Самая крупная в мире ГеоЭС мощностью 900 МВт построена на парогазовом месторождении Гейзеры Сонома. Температура пара в подземном резервуаре достигает 285°C, на выходе падает до 200 °C [8]. В Италии (г.Лардерелло) в 1904 г. пущена в эксплуатацию первая в мире ГеоЭС. К 2000 г. действовали более 40 ГеоЭС суммарной мощностью 790 МВт. Использование геотермального тепла на нужды теплоснабжения возрастает, особенно в коммунально-бытовом секторе и промышленности [8]. В Исландии более половины населения страны обогревается за счет геотермальной энергии, тепловая мощность геотермальных энергетических установок составляет около 1500 МВт, столица страны г. Рейкьявик полностью переведена на геотермальное теплоснабжение, где потребляется 2350 л/с термальной воды с температурой от 85 до 127°C [8]. В Новой Зеландии для выработки электроэнергии потребляется 435 МВт, для теплоснабжения гражданских и промышленных объектов – 308

МВт [8]. В Японии геотермальные ресурсы получают развитие не только для выработки электрической энергии, но и для отопления и горячего водоснабжения жилых и производственных зданий, для технологических целей, в курортном деле и т. п. В стране насчитывается тысячи термальных курортов. Установленная мощность всех ГеоЭС составляет 535 МВт, мощность установок прямого использования тепла – 258 МВт [8]. Франция в последние десятилетия выдвинулась на одно из первых мест в мире в области геотермальных исследований и практического использования подземного тепла. Основным направлением использования геотермальной энергии является снабжение теплом и горячей водой жилых и административных зданий. Тепловая мощность геотермальных установок составляет 326 МВт [8].

На территории России разведано 47 геотермальных месторождений, которые позволяют получить более 240 000 м³/сут термальной воды и парогидротерм производительностью более 105 000 м³/сут. Пробурено более 3000 скважин с целью извлечения геотермальных ресурсов [8]. Проблемами использования тепла земли занимаются около 50 научных организаций, которые находятся в ведении Российской академии наук и ряда министерств. В России геотермальное производство сконцентрировано на Северном Кавказе и на Камчатке. Внутри Северо-Кавказского региона выделяются Дагестан и Краснодарский край, где ежегодно добывается по 8–10 млн. м³ термальной воды с температурой 50 – 110 °С. В основном вода используется для отопления зданий жилого фонда, промышленных предприятий и теплично-парниковых комплексов [8].

Для юга России характерно применение геотермальных источников. В Краснодарском крае пробурено 79 скважин глубиной до трёх километров, разведано 18 геотермальных месторождений с потенциальной мощностью 258 МВт. Краснодарский край готовится осваивать альтернативные источники энергии: горячие подземные источники, солнце и биологические источники. По мнению руководителя департамента по вопросам ТЭК Краснодарского края Вадима Лукоянова, в крае эксплуатируется 50 геотермальных скважин, из которых добывается

до 10 млн. м³ воды с температурой 75 – 100 °С, что позволяет замещать до 45 тыс. тонн условного топлива. Впервые в России сформирован региональный пакет инвестиционных геотермальных проектов, что позволит определить приоритетность, сроки и объемы работ по обеспечению геотермальным теплом и электроэнергией районы края.

По теплосодержанию источник горячей воды с температурой 100°С и дебитом 1000 м³ 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 [134]. Все трудоемкие процессы в теплицах механизированы мобильными и стационарными устройствами. Площадь обслуживания в теплицах составляет примерно 1000 м² на одного работника [143].

Эксплуатационные характеристики теплиц в различных районах страны во многом определяются принятыми проектными решениями, основными положениями выбора и обоснования проектных параметров теплицы, учета нормативных требований. Строительные конструкции теплиц рассчитывают с учётом воздействия ветровых и снеговых нагрузок, веса шпалер с подвешенными к ним растениями, веса подвешенного к каркасу технологического оборудования и собственного веса конструкций, а также нагрузок, возникающих в процессе перевозки и монтажа, и температурных климатических воздействий (в отдельных случаях – сейсмических, просадки оснований и др.).

Расход тепла и тепловую мощность систем отопления и вентиляции теплиц определяют на основе теплового баланса с учетом следующих факторов:

- теплопотерь через ограждающие конструкции сооружений, почву;
- подогрева приточного и инфильтрующегося наружного воздуха;
- тепlopоступлений в холодный период года от почвы и технологического оборудования и в теплый период года от солнечной радиации [143].

Расчет системы отопления (рисунок 1.3) осуществляют для условий стацио-

нарного ночного режима, её мощность определяют как разность расчетных температур воздуха (внутренней (агротехнический минимум) и наружной (средней многолетней температуры наиболее холодных суток для зимних месяцев или средней температуры наиболее холодного месяца за период эксплуатации, сниженная наполовину максимальной суточной амплитуды для весенних теплиц). Расчет систем вентиляции учитывает условия нестационарного дневного режима, связанного с поступлением тепла от солнечной радиации.



Рисунок 1.3 – Фрагмент системы водяного отопления тепличного комплекса [203]

В зимних теплицах применяют водяное отопление или водяное отопление в сочетании с воздушным, т.е. комбинированное отопление, а также водяной обогрев почвы. В весенних теплицах предусматривают воздушное отопление, в особых случаях – водяной и электрический обогрев почвы. Приборы отопления размещают в верхней зоне (под покрытием, водосточными лотками и карнизами), в средней зоне (у наружных стен и на внутренних стойках каркаса), в нижней зоне (по контуру наружных стен на глубине 0,05-0,1 м, а для обогрева почвы – равно-

мерно на глубине не менее 0,4 м от проектной отметки поверхности почвы до верха приборов (труб) отопления).

Для водяного обогрева теплиц применяют стальные трубы с антикоррозийной защитой, стеклянные и пластмассовые трубы, для обогрева почвы – пластмассовые трубы. Для равномерного распределения тепла 40% приборов отопления (включая подпочвенный обогрев) располагают в зоне до 1 м над отметкой почвы. При этом площадь нагревательных приборов у наружных стен, отнесенную на 1 м² их поверхности, принимают на 25% больше площади остальных нагревательных приборов (кроме тех, которые обогревают почву), отнесенной на 1 м² покрытия теплицы. Рекомендуется применение переносных отопительных приборов типа гладких труб или регистров из них (калачи), воздухопроводов и др. Приборы отопления в верхней, средней и нижней зонах теплицы должны иметь отдельное включение и регулирование за счет секционирования.

Для поддержания заданного светового (радиационного) режима в теплицах проводят инженерные и агротехнические мероприятия, которые определяются данными суточного и годового графика естественного освещения и солнечной радиации. Практические расчеты ведут методом коэффициентов; на них умножают значения интегральной по спектру суммарной солнечной радиации или ее составляющих (прямой радиации от солнца и рассеянной) имеющиеся в климатических справочниках или непосредственно измеренные [143].

Тепличные комбинаты площадью 6, 12, 18, 24 и 30 га представляют собой единый массив застройки с четким разделением территории на зону основного производства (теплицы и примыкающие к ним или расположенные между ними сооружения и площадки) и вспомогательную зону (здания, сооружения, площадки, предназначенные для обслуживания основного технологического процесса) [143]. В зоне основного производства теплицы сгруппированы в шестигектарные блоки (рисунок 1.4), состоящие из одно-, трех-, шестигектарных зимних блочных теплиц или из ангарных теплиц площадью более 1000 м², объединенных соединительным коридором или блоком бытовых и вспомогательных помещений.

Здесь рекомендуется располагать энергетический пункт, трансформаторную подстанцию, растворно-насосный узел, участок для резервного выращивания рассады и медоносных трав, при необходимости – зимовник для пчел.



Рисунок 1.4 – Теплицы, сгруппированные в гектарные блоки [195]

Вспомогательная зона может быть единой для всего комбината или состоять из минимального числа (не более двух) четко связанных с основным производством подзон. Она имеет самостоятельные технологические группы: административно-бытовую, складскую, транспортно-механическую, энергетическую и агротехнического обслуживания [143].

Здания и сооружения этих групп максимально объединены в укрупненные блоки с удобной связью с основным производством и коммуникациями. Лучшее место расположения вспомогательной зоны – северная часть участка или со стороны господствующих ветров.

Тепличный комбинат располагают на участках, находящихся на большом удалении от источников сосредоточенного запыления и загрязнения стекла. Предполагается, что грунты оснований являются хорошо дренируемыми, причём горизонты грунтовых вод, лежащих на 1,5–2 м (или немногим больше) ниже от-

меток земли с хорошими условиями их естественного оттока; желательно наличие резервных территорий для последующего расширения комбината.

Используют площадки на южных склонах с естественной защитой от ветров (лесные насаждения, возвышенности и др.); кроме того, они должны быть компактными, с соотношением сторон 1:2 (коэффициенты плотности застройки комбината из крупных блочных теплиц могут достигать значений 0,60 и выше). Производственную зону и зоны подсобных и складских сооружений располагают с учетом наибольшей защищенности теплиц от зимних господствующих ветров. При отсутствии естественной защиты подсобные и складские здания размещают с наветренной стороны, предусматривают создание соответствующих лесозащитных полос (используют быстрорастущие деревья и кустарники) [143].

Рассадные теплицы (рисунок 1.5) или отделения изолируют и располагают, по возможности, в южной части или в середине застройки производственной зоны (в наиболее освещенной и защищенной от ветров части застройки), котельные – с подветренной относительно теплиц стороны.



Рисунок 1.5 – Рассадные теплицы [196]

В южных и центральных районах, северная граница которых проходит по широте 60° , стационарные теплицы (для максимальной освещенности в зимний, ранневесенний и позднесенний периоды и минимального перегрева летом) ориентируют коньками по оси «восток-запад» с возможным отклонением до 30° .

1.2 Методы и оборудование для снижения солеотложения в теплотехнических системах

Отложение на стенках теплоэнергетических аппаратов разнообразных солей приводит к их неэффективной работе, совершается перерасход топлива и остановка технологического процесса для очистки. Механизм отложения солей следующий: в воде зарождаются и вырастают кристаллы солей, которые в дальнейшем появляются на внутренних стенках теплообменных аппаратов, если около них находится перенасыщенный раствор жидкости. Для решения проблемы используют магнитную обработку воды, которая удачно дополняет химическую водоподготовку и позволяет результативно очистить от накипи внутренние стенки магистральных и оборотных систем водоснабжения аграрных предприятий [111].

Для обеспечения безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов существует водный режим, предполагающий защиту их элементов от повреждений из-за отложения накипи и шлама, превышения нормы щелочности котловой воды или коррозии металла, с целью обеспечивать получение пара надлежащего качества [60]. Все котлы, обеспечивающие производительность пара 0,7 тонн/час и более, должны иметь оборудование в виде установок для докотловой обработки воды. Таким образом, 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 [111].

Качество воды для котлов должно удовлетворять установленным нормам общей жесткости, а именно:

- для котлов газотрубных и жаротрубных, работающих на твердом топливе, не более 500 мкг-экв/кг;
- для котлов газотрубных и жаротрубных, работающих на газообразном и жидком топливе, не более 30 мкг-экв/кг;

- для водотрубных котлов с рабочим давлением 1,4 Мпа не более 20 мкг-экв/кг [60].

В теории водоподготовки принято различать следующие типы жесткости:

- постоянная (некарбонатная) связана с наличием в воде хлоридов, сульфатов и других некарбонатных солей магния и кальция;
- временная (карбонатная) связана с наличием в воде бикарбонатов кальция и магния ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$) [111].

Нормы содержания солей и щелочности котловой воды сформированы в результате испытаний:

- для паровых котлов с клепаными барабанами относительная щелочность котловой воды не должна превышать 20%;
- для паровых котлов со сварными барабанами допускается повышенное содержание относительной щелочности котловой воды, при принятии мер по предупреждению межкристаллической коррозии металла [60].

Поверхностные воды рек, озер и искусственных водохранилищ, подземные воды из артезианских скважин могут служить *источниками водоснабжения* производственных и отопительных котельных в агропромышленном комплексе. Как правило, поверхностные воды всегда содержат нерастворенные механические примеси и растворенные вещества, а подземные воды практически не содержат механических примесей, но солесодержание подземных вод обычно выше, чем поверхностных.

При использовании в котельной воды из открытых источников рекомендуются следующие методы обработки воды с целью удаления взвешенных и органических веществ: фильтрование через однослойные и двухслойные механические фильтры; осветление с последующим фильтрованием через механические фильтры; известкование с коагуляцией и последующим осветлением или фильтрованием [60].

С целью смягчения и снижения щелочности исходной воды могут быть применены различные методы катионирования, ионирование и известкование с коагуляцией. Предпочтение метода обрабатывания воды для тепловых сетей обу-

словлено требованиями к качеству подпиточной воды и зависит от системы теплоснабжения. При подогреве сетевой воды в водогрейных котлах для открытых или закрытых систем теплоснабжения надо уменьшить карбонатную жесткость подпиточной воды до 0,7 мг-экв/кг [111].

Также источниками водоснабжения производственных и отопительных котельных агропромышленного комплекса могут быть геотермальные источники, применение которых широко распространено на юге России. С середины 60-х годов XX века геотермальная энергетика стала одним из направлений использования недр Земли. В различных районах Кавказа и на Камчатке были созданы разведочные экспедиции по бурению и реконструкции нефтегазовых скважин термальных вод. В России имеются большие геотермальные ресурсы, энергия которых больше потенциала органического топлива. Использование геотермальной энергии может составить десятую часть общего баланса теплоснабжения. На территории России разведано 66 геотермальных месторождений (Камчатско-Курильский, Западно-Сибирский и Северо-Кавказский регионы), пробурено свыше 4000 скважин для использования геотермальных ресурсов. Эти месторождения способны обеспечить получение до 10000 МВт тепловой и 200 МВт электрической мощности. В указанных регионах геотермальное электро- и теплоснабжение может составить до 50–95% от общего потребления энергии.

Существуют различные классификаций подземных вод по ионному составу. В большинстве классификаций применяется процент-эквивалентная форма выражения состава вод. Во всех классификациях авторы считают, что таксономическое значение анионов выше, чем катионов. В результате воды разделены на три основных класса: гидрокарбонатные, сульфатные и хлоридные. В классификации Н.И. Толстихина [8] внутри классов выделены подклассы по преобладающему катиону – кальциевый, магниевый и натриевый. По О.А. Алекину [8] указанные классы также разделены по преобладающим катионам на три группы: кальциевые, магниевые и натриевые. В пределах групп по соотношению ионов устанавливаются четыре типа вод. В своей классификации В.А. Сулин [8] разделил воды на 4 типа по характерным соотношениям главных ионов: сульфатно-натриевый,

гидрокарбонатно-натриевый, хлор-магниевый и хлор-кальциевый. Далее типы вод разделены на группы и подгруппы по преобладающему аниону и катиону.

В зависимости от газового состава, а также геологических, геохимических и температурных условий формирования выделяются пять основных генетических типов термальных подземных вод: сероводородно-углекислые (фумарольные), углекислые, азотно-углекислые, азотные (щелочные) и метановые [8].

Сероводородно-углекислые геотермальные воды формируются в зоне непосредственного воздействия очагов современной вулканической деятельности и распространены на Камчатке и Курильских островах. Они подразделяются на термы глубинного происхождения, насыщенные высокотемпературными газами, и поверхностного происхождения, залегающие в верхних слоях вулканогенных пород. Минерализация сероводородно-углекислых терм обычно невелика (3–5 г/л), но иногда 20 г/л и более. Преобладающими среди анионов являются хлориды и сульфаты. Температура вод колеблется от 40 до 100 °С [8].

Углекислые геотермальные воды генетически связаны с толщами осадочных отложений, прорванных молодыми магматическими породами. Углекислота, насыщающая подземные воды в сфере магматических очагов, образуется при воздействии высоких температур на окружающие породы. Химический состав сложный и разнообразный. Содержание кремниевой кислоты достигает до 200 мг/л, а общая минерализация от 2 до 40 г/л. Углекислые воды распространены на восточной Камчатке, на Памире и в районе Кавказских Минеральных Вод (Пятигорск, Железноводск, Ессентуки) [8].

Азотно-углекислые геотермальные воды (парогидротермы) – сильно перегретые воды, температура которых на сравнительно небольшой глубине достигает 200–300 °С. На поверхности воды появляются в виде пароводяных струй (гейзеры) или кипящих источников. При вскрытии таких вод скважинами также образуются пароводяные фонтаны. Формирование азотно-углекислых терм происходит в восстановительных высокотемпературных условиях в непосредственной близости от активных вулканов. Приурочены такие воды к вулканическим

или вулканогенным осадочным породам (на Камчатке – Долина Гейзеров, Паужетские источники). Азотно-углекислые термы характеризуются обычно невысокой минерализацией (2–5 г/л) и хлоридно-натриевым составом. Отличительной чертой таких вод является высокое содержание кремниевой кислоты (300–600 мг/л) [8].

Азотные (щелочные) геотермальные воды бывают как атмосферного и глубинного, так и морского происхождения. Они широко распространены в горно-складчатых и платформенных областях. Вода атмосферного происхождения характеризуется низкой минерализацией (менее 1,5 г/л), гидрокарбонатно-натриевым и сульфатно-натриевым составом и высоким содержанием кремниевой кислоты (до 200 мг/л). Формирование химического состава этих вод происходит в результате выщелачивания пород инфильтрационными водами. Вода морского происхождения отличается высокой минерализацией (до 40 г/л), хлоридно-натриевым составом и наличием характерных микрокомпонентов – брома и йода [8].

Метановые геотермальные воды широко распространены в нефте-газоносных артезианских бассейнах Русской и Сибирской платформ, Западно-Сибирской низменности, Северного Кавказа и других районов. Эти воды приурочены к осадочным отложениям глубинных частей артезианских бассейнов. Минерализация вод составляет от нескольких граммов до 400–500 г/л. Воды малой минерализации по составу являются гидрокарбонатно-натриевыми, высокоминерализованные воды и рассолы имеют хлоридно-натриевый состав [8].

Газонасыщенность (Γ , мг/л) термальных вод может быть охарактеризована как слабая ($\Gamma \leq 100$), средняя ($100 < \Gamma \leq 1000$) и высокая ($\Gamma > 1000$). На Северном Кавказе разработаны геотермальные месторождения, залегающие на глубинах от 300 до 5000 м, температура которых достигает 180°C и более.

В Краснодарском крае и Адыгее разведано 18 месторождений геотермальных вод, в том числе 14 эксплуатируемых и 5 недействующих [33]. Всего в данном регионе пробурено 79 геотермальных скважин, из которых 40 эксплуатируются. Структура добычи геотермальной воды в данном регионе при суммарном

значении 8567000 м³ следующая:

- Ульяновское (1 скважина) – 18300 м³ (0,2 %);
- Грязнореченское (1 скважина) – 183000 м³ (2,1 %);
- Лабинское (1 скважина) – 311200 м³ (3,6 %);
- Отрадненское (2 скважины) – 383299 м³ (4,5 %);
- Южно-Вознесенское (3 скважины) – 13 486000 м³ (5,7 %);
- Майкопское (7 скважин) – 1537800 м³ (18 %);
- Вознесенское (5 скважин) – 1662800 м³ (19,4 %);
- Мостовское (13 скважин) – 3984700 м³ (46,51 %).

Структура потребления геотермальной воды на обогрев теплиц при общем объёме 4632600 м³ имеет вид:

- Майкопское – 860700 м³ (19 %);
- Вознесенское – 981900 м³ (21 %);
- Мостовское – 2750000 м³ (60 %).

Рассмотрим структуру потребления на отопление и горячее водоснабжение при общем объёме 3974400 м³:

- Ульяновское – 183000 м³ (0,5 %);
- Грязнореченское – 183000 м³ (4,6 %);
- Лабинское – 311200 м³ (7,9 %);
- Отрадненское – 383200 м³ (9,7 %);
- Южно-Вознесенское – 468000 м³ (11,8 %);
- Майкопское – 677100 м³ (17,1 %);
- Вознесенское – 680900 м³ (17,2 %);
- Мостовское – 124700 м³ (31,2 %) [34].

Экономическая эффективность использования термальных вод достигается на основе комплексного использования. Примером комплексного использования термальных вод служит Мостовское месторождение в Краснодарском крае (крупнейшее и наиболее разработанное). Геотермальная вода восьми скважин с температурой 70-73°С с дебитами каждой скважины 1200-1700 м³/сутки при давлении 0,5-2,5 кгс/см² поступает в бак-аккумулятор вместимостью 200 м³ гео-

термального ЦТП, затем насосами распределяется по теплицам, административным зданиям. Отработанная геотермальная вода поступает в бак сливной станции и насосами подаётся в пруды рыбопродуктивного хозяйства площадью 30 га, где выращивается до 1500 т рыбы в год. Экономические годовые показатели работы тепличного хозяйства: объём потребления геотермальной воды 1620 тыс.м³, при замещении топлива органического вида – 5,5 тыс. усл. тонн, объёме производимой овощной продукции – 645 тонн [33].

Термальная углекислая вода, как правило, насыщена карбонатом кальция, и при выходе на поверхность пресыщенный раствор выпадает в осадок. Отложения солей в трубах геотермальных систем (после устьевой задвижки, при переходе воды из трубы меньшего диаметра в больший и т.д.) кристаллические, в результате этого увеличивается гидравлическое сопротивление трубопроводов, с их полной закупоркой и выходом системы из строя [7].

Локализации отложения карбоната кальция в системах, использующих воды геотермальных месторождений, наблюдаются по трассе транспортировки воды. Эта локализация при прочих равных условиях зависит от значений давления и температуры (различных для вод разных месторождений), но чаще всего за задвижками, в местах резкого падения давления. Отложения в трубе на первых этапах имеют островной характер, затем они образуют сплошное кольцо отложений, на которое осуществляется поэтапное наложение.

Коррозионное воздействие геотермальных вод на металл обусловлено многими факторами: минерализацией, газосодержанием (сероводород, углекислота, кислород), давлением, температурой (наибольшая скорость коррозии наблюдается при температуре 60÷90°C), величиной pH и т. д. Самым опасным коррозионно-агрессивным компонентом в термальных водах является кислород. Кислород не содержится в геотермальных водах, он может попадать в воду через неплотности системы, при этом интенсивность насыщения термальных вод кислородом зависит от их температуры и минерализации. Поэтому особенно тщательно должна быть обеспечена герметичность систем теплоснабжения, чего можно добиться

применением сварных соединений и сведением до минимума резьбовых соединений и арматуры. В периоды консервации системы теплоснабжения, во избежание подсоса воздуха, все коммуникации и оборудование, соприкасающиеся с геотермальным теплоносителем, необходимо заполнить водой. Сероводород (H_2S) увеличивает скорость коррозии до 40%, максимальное значение скорости коррозии достигается, когда его концентрация 4 – 5 мг/л [8].

Коррозия, вызываемая углекислотой (CO_2), является минимальной по сравнению с кислородной и сероводородной. Коррозионное воздействие на металл оказывают ионы хлора в сочетании с сероводородом и углекислотой. При попадании в термальную воду кислорода сероводородная коррозия интенсифицируется в 2 раза, углекислотная в 1,5 раза, а хлор-ионная в 3–4 раза. В некоторых термальных водах содержатся сульфатредуцирующие бактерии, которые при попадании в системы теплоснабжения могут ускорять коррозию в 10–15 раз.

Существует целый ряд химических реагентов для снижения солеотложения в теплотехнических системах, производимых в России, таких как: ИОМС, ОЭДФ, АФОН, ПАФ, НТФ, – комплексонов на основе солей фосфорорганических кислот, рекомендуемых к применению в контурах водогрейных котлов и тепловых сетей для связывания части ионов жесткости в растворимые соединения. Не вдаваясь в химическую сущность действия этих реагентов, можно сказать, что все они препятствуют росту кристаллов малорастворимых солей жесткости на внутренних поверхностях элементов оборудования, не оказывая влияния на значение рН теплофикационной воды и содержание коррозионно-активных растворенных газов. Цинковый комплекс оксиэтилендифосфоновой кислоты, $Na_2ZnOЭДФ$, позиционировался как химический реагент, тому же, при планировании условий эксплуатации системы отопления, следует учитывать определенную токсичность входящих в состав данных реагентов химических соединений. Как указано в [72], широкое применение комплексонов на основе фосфонатов нередко приводит к отрицательным последствиям (забивание проходов в пучках теплообменных трубок сетевых подогревателей карбонатами кальция и магния).

Основным способом умягчения воды для теплосетей является на сегодня метод ионного обмена. В технологии водоподготовки существуют два основных способа удаления из воды ионизированных примесей: катионирование и анионирование. В зависимости от обменного иона процессы, аппараты и фильтраты называют: Na-катионирование, Na-катионитный фильтр; H-катионирование, H-катионитный фильтр; OH-анионирование, OH-анионитный фильтр; Na-катионированная вода, H-катионированная вода, OH-анионированная вода и т.п. Na-катионирование является самостоятельным процессом и используется для умягчения воды. Процессы H- и OH-ионирования реализуются совместно в схемах обессоливания воды. H-катионирование осуществляется в схемах H-Na-катионирования воды [74].

Качество подпиточных водопроводных сетей с открытой системой теплоснабжения должно отвечать требованиям ОСТ 24.030.47-75 и ГОСТ 2874-73 "Вода питьевая". Для подпитки тепловых сетей, где не требуется удаление солей постоянной жесткости, широко применяется схема H-катионирование с "голодной" регенерацией. Катионирование при помощи Na для размягчения жидкости применяют для артезианской или осветленной воды с содержанием взвешенных веществ не более 5...8 мг / кг, если не требуется уменьшения щелочности исходной воды [111].

Реагентные методы обработки воды, используемой в теплосистемах, основаны на изменении её качеств при помощи специальных веществ-реагентов. Полифосфатная обработка воды (введение в геотермальную воду, например, гексаметафосфата натрия (ГМФН) в количестве 1–3 мг/л в пересчете на P_2O_5) поддерживает значение pH примерно на уровне 6,5 – 7,5, предотвращает формирование отложений карбоната кальция на основе образования адсорбционной пленки метафосфатных соединений на микрокристаллах $CaCO_3$. Дозу ГМФН определяют в процессе эксплуатации. Комбинированное применение полифосфатных соединений и силиката натрия обеспечивает стабильность воды в геотермальной скважины. Глубокая дегазация термальных вод (рис. 1.6) предусматривает последовательность операций: из скважины вода поступает в вакуумный дегазатор, а затем

в накопительный бак, который также выполняет функцию отстойника для выпадающего из воды в процессе дегазации минерального шлама.



Рисунок 1.6 – Схема подготовки термальных вод, склонных к солеотложению [7]

Вода из накопительного бака направляется в теплообменник, в котором пресной умягченной воде передаётся тепло (умягчённая вода направляется в систему теплоснабжения). На схеме показаны две параллельные линии: в период работы одной линии вторая очищается от накопившегося шлама. Отработанная термальная вода направляется на поверхность или закачивается обратно в пласт (если есть компоненты, препятствующие сбросу на поверхность земли) [7]. Недостатком всех реагентных методов является необходимость особых сооружений для сохранения и дозирования реагента, проверки его действий, квалифицированного обслуживающего персонала [7].

Схемы теплоснабжения обуславливаются гидрогеотермическими характеристиками и качеством геотермального теплоносителя. Потребителей систематизируют исходя из требований их потенциального носителя, последовательности выполнения плана водоснабжения с учетом предельной температуры использования, делают технико-экономическое обоснование нескольких вариантов систем отопления.

Рассмотрим схемы теплоснабжения:

1) Простейшая схема теплоснабжения возможна при значительном качестве геотермальной воды, т.е. при небольшой минерализации воды, отсутствии в ней вредных для здоровья людей компонентов и при наличии проблем, связанных с

коррозией и отложениями солей на теплотехническом оборудовании (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Схема теплоснабжения параллельной подачи термальной воды на отопление и горячее водоснабжение [7]

Геотермальная вода из скважины подаётся в изолированный накопительный резервуар, отсюда насосом отправляется в системы отопления и горячего водоснабжения. Геотермальная скважина эксплуатируется с неизменным расходом, равным суммарному среднечасовому расходу на отопление и горячее водоснабжение. Неравномерное потребление воды для горячего водоснабжения в течение дня регулируется аккумуляторным баком. В часы наибольшего потребления воды из резервуара для хранения отбирается дополнительное количество воды и, напротив, в часы наименьшего потребления вода из скважины скапливается в резервуаре.

2) Схема теплоснабжения с пиковым догревом воды (рис. 1.8).

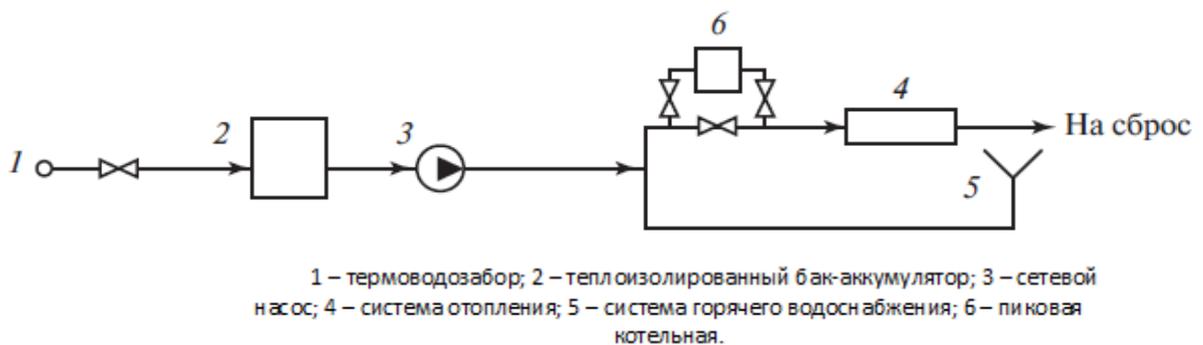


Рисунок 1.8 – Схема теплоснабжения с пиковым догревом и параллельной подачей термальной воды на отопление и горячее водоснабжение [7]

3) Система теплоснабжения с тепловыми насосами применяется, если температура термальной воды небольшая (до 55 °С) (рис. 1.9). Термальная вода из

скважины попадает в испаритель теплового насоса, передает тепло испаряющемуся рабочему агенту и охлаждается.

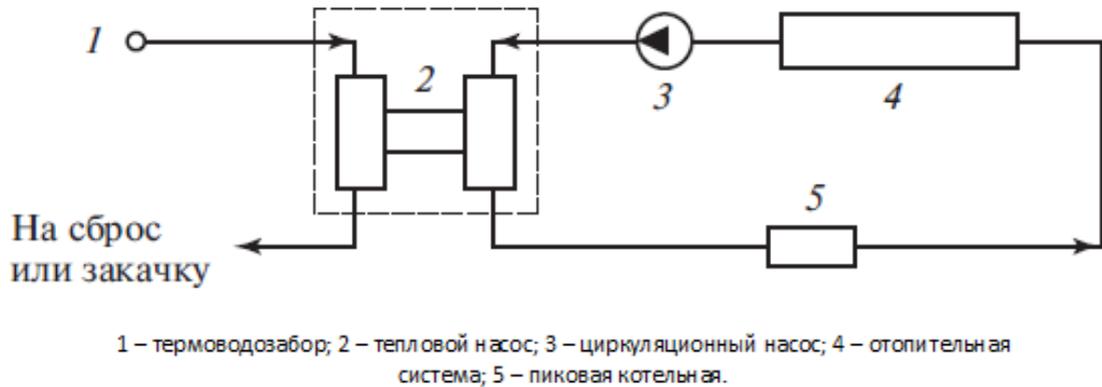


Рисунок 1.9 – Схема геотермального теплоснабжения с тепловым насосом [7]

Полученный пар сдавливается компрессором с увеличением его температуры и попадает в конденсатор. В конденсаторе тепло паровой фазы отдается воде, циркулирующей в контуре системы отопления. Если химический состав неудовлетворительный, тогда вода сбрасывается на поверхность или закачивается назад в материнский слой, либо посылается на установку химической очистки воды для приведения ее в условия питьевого или технического водоснабжения. При надобности систему возможно снабдить пиковым котлом.

4) Замкнутая однотрубная геотермальная система теплоснабжения используется, когда тепловой забор находится вблизи потребителей горячей воды (рис. 1.10).

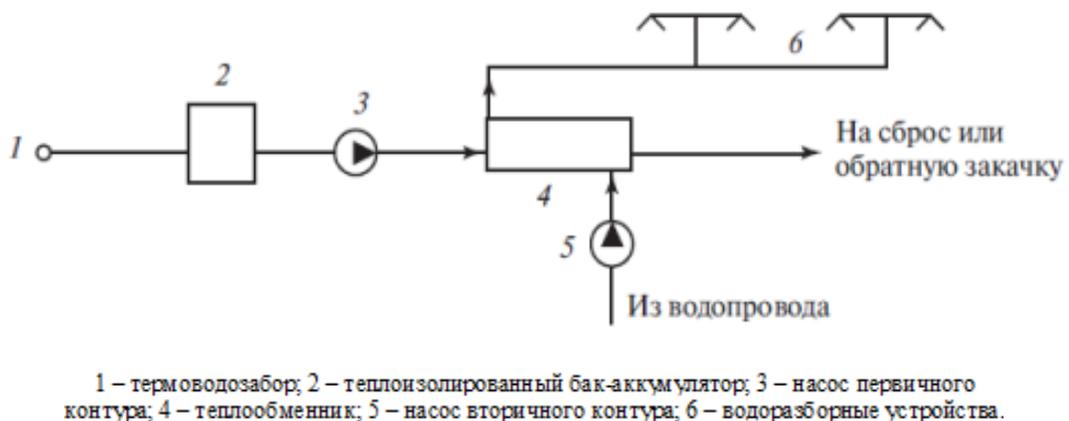
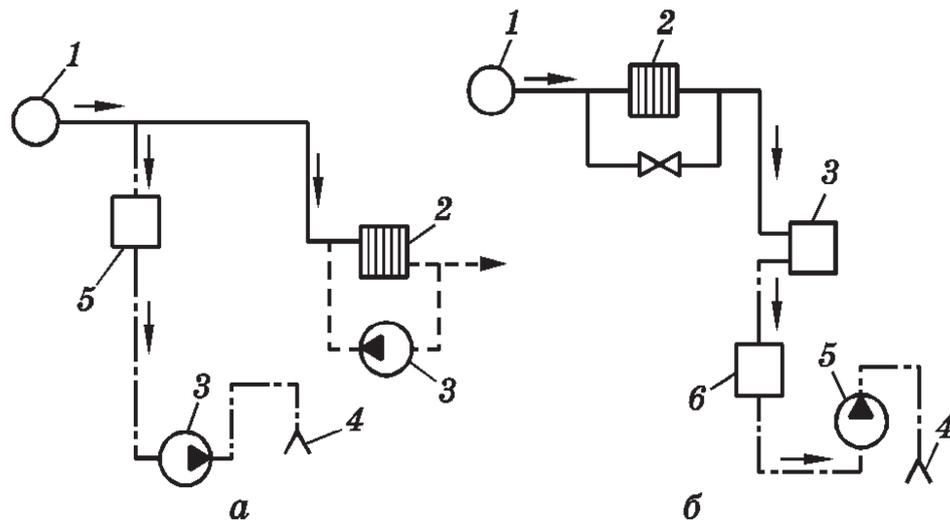


Рисунок 1.10 – Схема однотрубной закрытой системы горячего водоснабжения [7]



а – параллельная; 1 – скважина; 2 – система отопления; 3 – насосы; 4 – система горячего водоснабжения; 5 – бак-аккумулятор; б – последовательная; 1 – скважина; 2 – система отопления; 3 – устройство пикового догрева; 4 – система горячего водоснабжения; 5 – насос; 6 – бак горячей воды.

Рисунок 1.11 – Схема подачи геотермальной воды на отопление и горячее водоснабжение [10]

Геотермальная вода из резервуара для хранения перекачивается в теплообменник, где холодная вода поступает из водопроводной трубы. В теплообменнике нагревается водопроводная вода, после чего она направляется в систему горячего водоснабжения. Отработанная минерализованная вода из теплообменника направляется на сброс или закачивается в пласт через нагнетательную скважину. Но отсутствие циркуляции теплоносителя при водосборе (например, в ночное время) приводит к охлаждению воды в магистральных и распределительных трубах.

5) Схема с параллельным или последовательным подводом воды для отопления и горячего водоснабжения с пиковым нагревом применяется, если потребность в тепле превосходит тепловую возможность эксплуатационных ресурсов геотермальной воды. В качестве примера приведена схема с параллельным (рис.1.11,а) и последовательным (рис. 1.11, б) геотермальным подогревом воды.

б) Схема двухтрубной геотермальной системы отопления и горячего водоснабжения показана на рисунке 1.12.

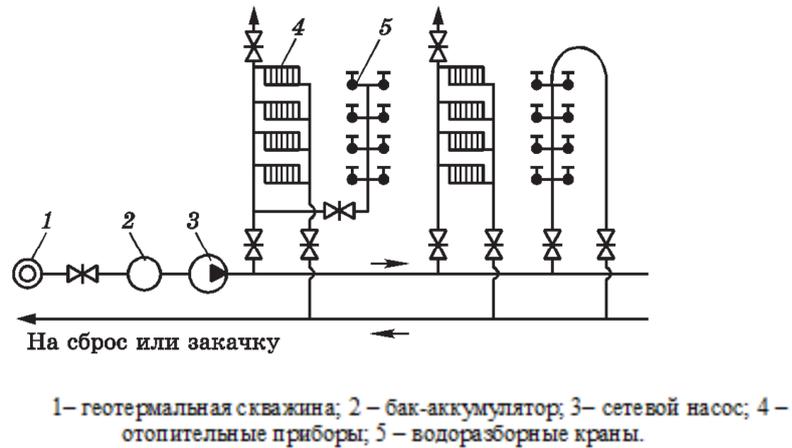


Рисунок 1.12 – Открытая двухтрубная геотермальная система теплоснабжения [10]

7) Система, в которой присутствует центральный пункт обогрева геотермальной установки (рис.1.13), более удобна в эксплуатации. В данном случае потребителю тепла передается химически очищенная вода, что увеличивает срок службы систем теплоснабжения.

Если необходимо повысить температуру теплоносителя, то в систему подключают тепловые насосы или пиковый подогреватель. Одна из возможных схем геотермального теплоснабжения с применением тепловых насосов и котла показана на рисунке 1.14 [10].

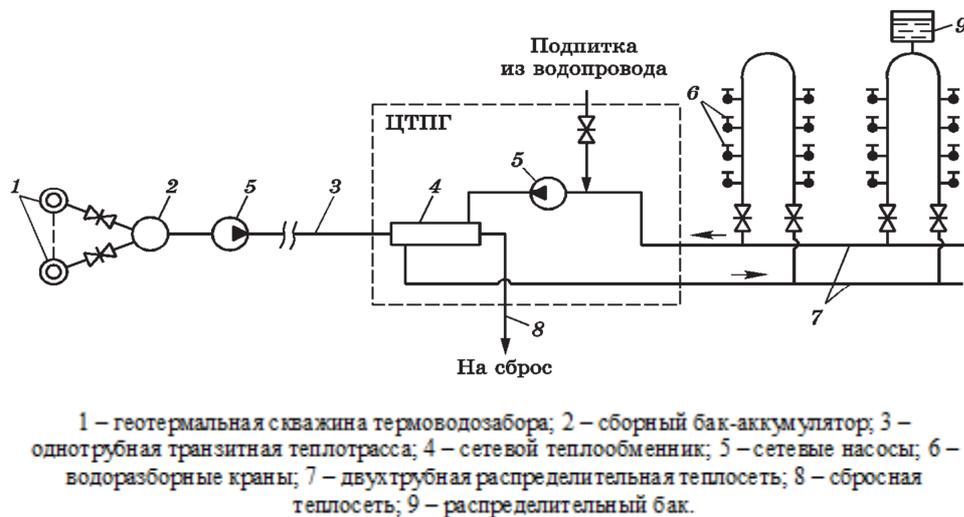
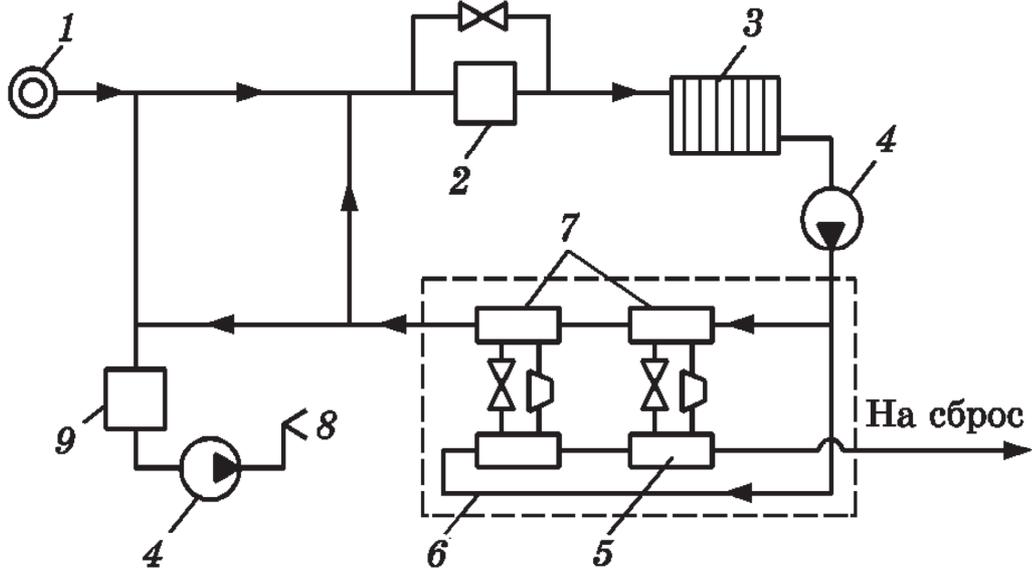


Рисунок 1.13 – Однотрубная закрытая геотермальная система горячего водоснабжения [10]



1 – скважина; 2 – пиковая котельная; 3 – система отопления; 4 – насосы; 5 – испарители; 6 – теплонасосная установка; 7 – конденсаторы; 8 – система горячего теплоснабжения; 9 – бак-аккумулятор.

Рисунок 1.14 – Принципиальная схема системы геотермального теплоснабжения с применением пикового догрева и теплового насоса [10]

8) Система с применением двух геотермальных скважин различного предназначения, одна из которых применяется для добычи геотермальной воды, а другая для возвращения ее в коллектор. Эта система является наиболее результативной, так как она увеличивает эксплуатационный период скважины, предотвращает загрязнение почвы [10].

Для теплоснабжения теплиц имеются следующие способы употребления геотермальной воды:

- прямая подача воды в систему отопления (рис. 1.15 а);
- прямая подача воды и предварительная обработка воды;
- прямая подача воды и нагрев в водогрейных котлах или теплообменниках (рис. 1.15 б);
- подача по независимой схеме и использование промежуточных теплообменников контактного, поверхностного и контактно-поверхностного типа (рисунок 1.15 в).

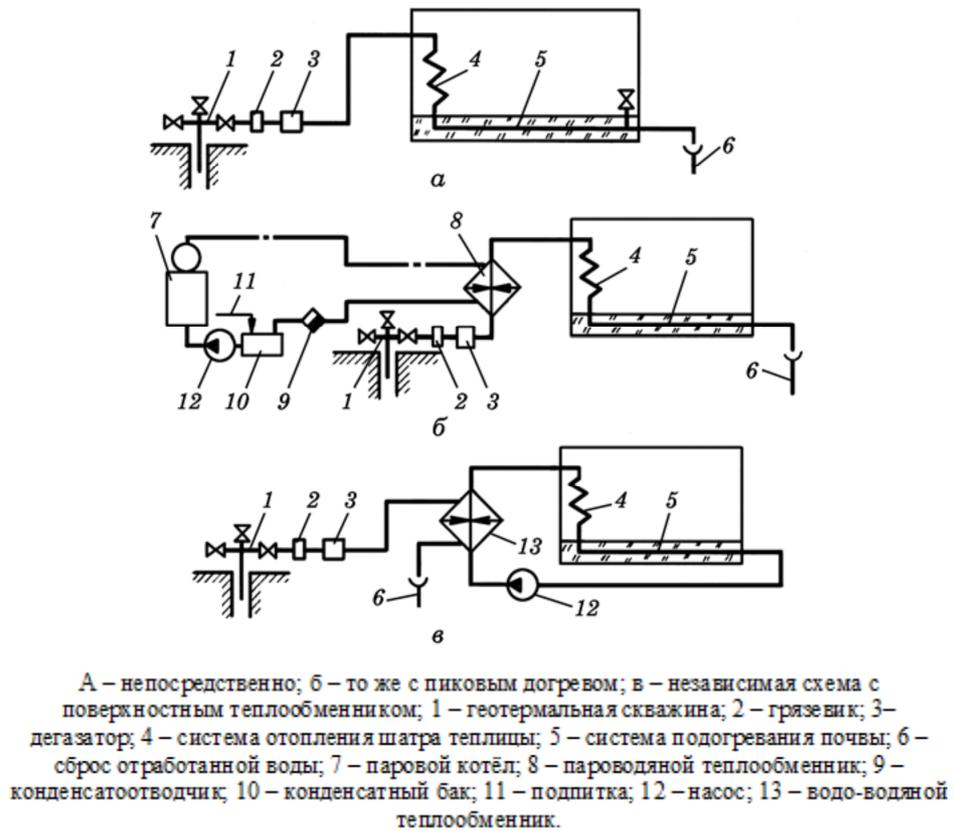


Рисунок 1.15 – Схема теплоснабжения теплиц с использованием геотермальных вод [10]

Теплообменник (рис. 1.16) – это устройство, в котором тепло передается от горячего теплоносителя к холодной (нагретой) среде через стальные, медные, титановые гофрированные пластины, стянутые в пакет. Горячие и холодные слои перемежаются друг с другом.

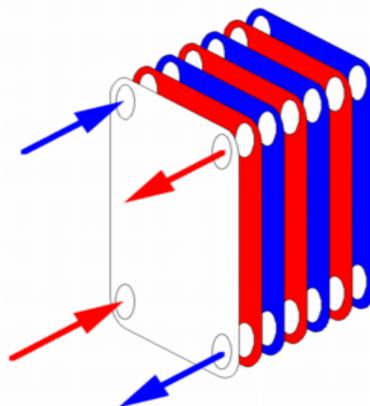


Рисунок 1.16 – Концептуальная схема пластинчатого теплообменника [204]

Основной элемент теплообменника – это теплообменные пластины, изготовленные из коррозионно-стойких сплавов толщиной 0,4-1,0 мм методом холодной штамповки (рис. 1.17 – 1.19).

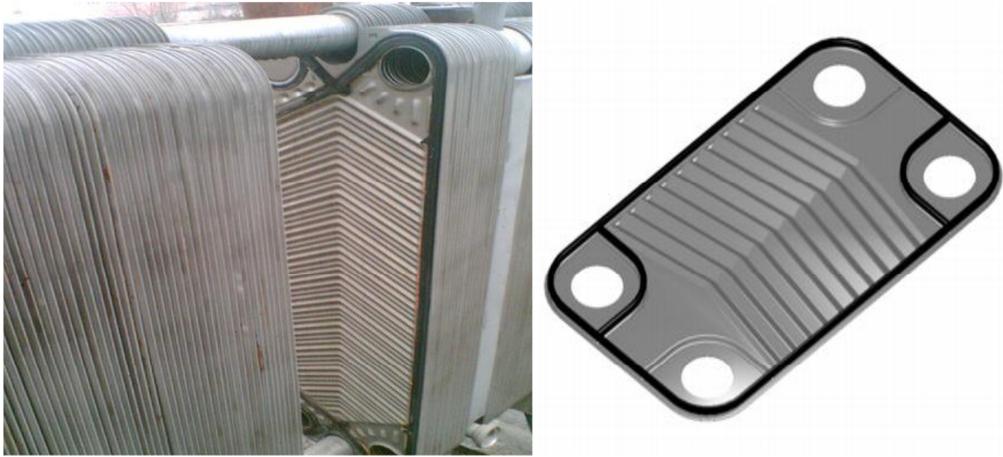


Рисунок 1.17 – Отдельная пластина теплообменника и пластины в нем [204]

В рабочем положении пластины плотно прижимаются друг к другу и создают щелевые каналы. На лицевой стороне каждой пластины (рисунок 1.18) в особых пазах поставлена резиновая прокладка, обеспечивающая герметичность каналов. Два из четырех отверстий в пластине обеспечивают подачу и отвод нагретой воды в канал. Остальные два отверстия дополнительно изолированы небольшими контурами прокладок, предотвращающими смещение нагретой воды [136].

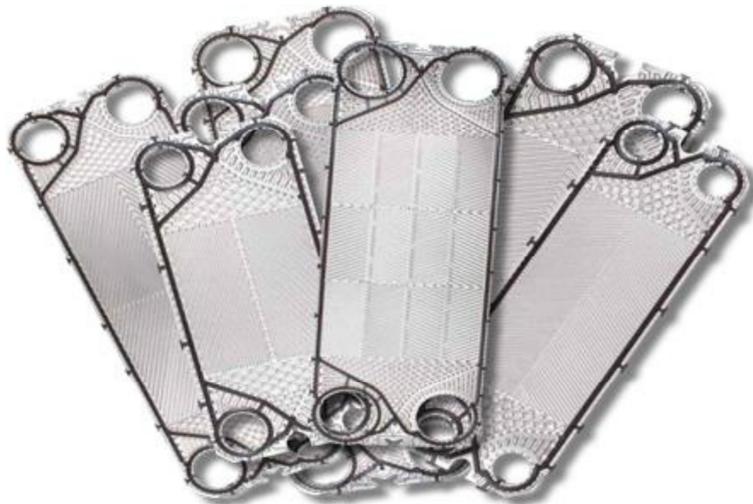


Рисунок 1.18 – Теплообменные пластины с уплотнительными прокладками [204]

Количество пластин в теплообменнике, их компоновка, материал, форма и размер зависят от конкретной задачи теплообмена двух сред. В зависимости от области применения пластины теплообменника могут быть изготовлены из хромоникелевых, хромоникелемолибденовых нержавеющей сталей, титана и других материалов [136].

По периметру пластины продавливают канавки для уплотнений. Предназначение уплотнителя – отделение каналов друг от друга, предотвращение утечек, смешивания воды. Они также определяют направление потока внутри пластинчатого теплообменника. Выбор материала зависит главным образом от используемых сред, а также их рабочих температур и давлений [136].

В пластинчатых теплообменниках (рисунок 1.19) соседние пластины образуют каналы, в которых горячие и холодные теплоносители попеременно перемещаются через пакет пластин. Пространственное извилистое течение жидкости в каналах способствует турбулентности потоков, а встречный поток между нагретой и нагреваемой средой увеличивает температурный напор и, как следствие, интенсификацию теплообмена при относительно низких гидравлических сопротивлениях. В этом случае отложение накипи на поверхности пластин резко снижается [136].



Рисунок 1.19 – Пластинчатые теплообменники [204]

При аналогичных параметрах пластинчатые теплообменники в 3-6 раз

меньше по размерам и составляют $1/6$ веса кожухотрубных теплообменников, при этом сохраняется площадь под установку и снижаются первоначальные затраты. Кожухотрубные теплообменники обеспечивают гораздо более низкие коэффициенты теплопередачи, чем пластинчатые теплообменники с аналогичными потерями давления. Даже в лучших кожухотрубных теплообменниках значительные поверхности труб находятся в мертвых зонах с низкой теплопередачей. В отличие от кожухотрубных пластинчатых теплообменников, они легко разбираются [136].

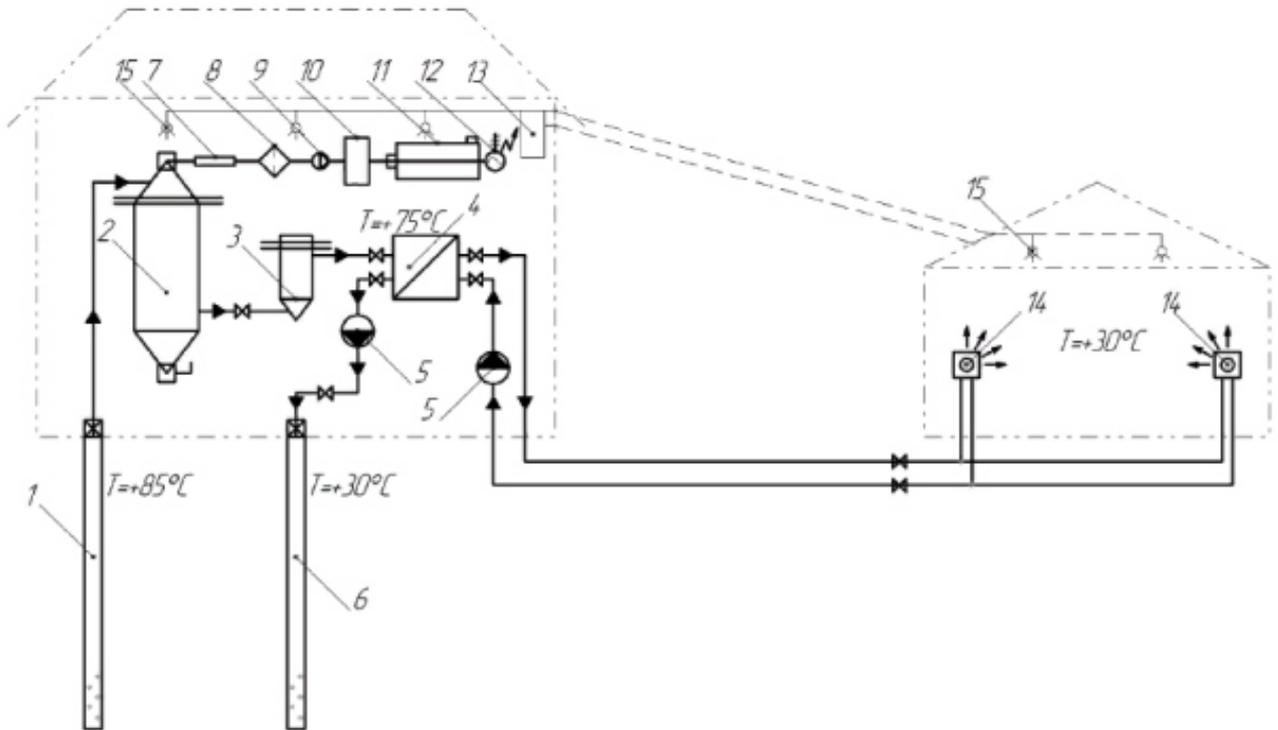
При значительном отличии в расходе сред, а также при небольшой разнице в конечных температурах сред существует вероятность неоднократного теплообмена сред путем петлеобразного направления их потоков. В таких теплообменниках патрубки для подвода сред размещены не только на неподвижной плите, но и на прижимной, а вдоль пластин-перегородок среды перемещаются в одном направлении [136].

На рисунке 1.20 приведена принципиальная схема геотермального теплообменника тепличного комплекса. Блочная водоподготовительная установка ВПУ-10-М (рисунок 1.21) осуществляет четыре схемы обработки воды: Na-катионирование; совместное NH_4 -Na-катионирование; осветление – Na-катионирование; осветление – совместное NH_4 -Na-катионирование. Исходная вода после теплообменника подается насосом в осветлительный фильтр, пройдя который, поступает в катионный фильтр [60]. Из теплообменника вода подается насосом в осветлительный фильтр и далее в катионитный фильтр. В зависимости от характеристик подаваемой в систему воды (температура, напор, качества) она может подаваться, минуя теплообменник или осветлительный фильтр или насос [60].

Установка водоподготовки состоит из двух катионитных фильтра, которые работают последовательно (параллельно, если увеличивается вдвое производительность). После умягчения вода подается в термический деаэратор для удаления растворенных в ней газов [60].

Оборудование работает по схемам Na-катионирования и NH_4 -Na-катионирования. Сульфат аммония и поваренная соль находятся на хранении в мокром виде (состояние насыщенного раствора). Работа по схеме Na-катионирования

предполагает, что бак-склад полностью заполняется раствором поваренной соли, который во время регенерации, может быть забран из обоих мерников.

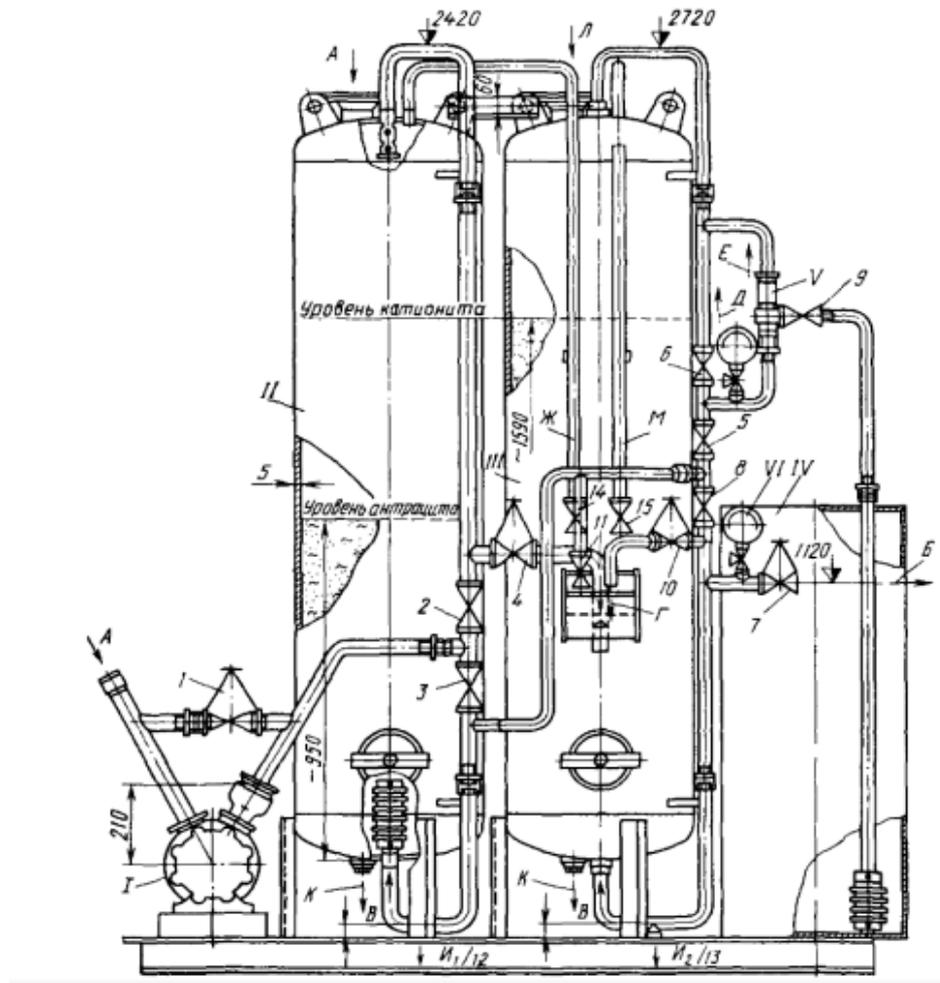


1 – производственная скважина геотермальной воды; 2 – сепаратор; 3 – фильтр тонкой очистки; 4 – теплообменник; 5 – насос; 6 – нагнетательная скважина геотермальной воды; 7 – трубчатый конденсатор; 8 – сетчатый фильтр; 9 – вакуум – компрессор; 10 – ресивер; 11 – модифицированный двигатель внутреннего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

Рисунок 1.20 – Принципиальная схема системы воздушно - конвекционного отопления и освещения тепличного комплекса с использованием геотермального источника энергии [206]

Работа по схеме $\text{NH}_4\text{-Na}$ - катионирования предполагает половину бака-склада и один мерник, который используется для хранения и получения насыщенного раствора сульфата аммония, а так же отмеривания его [60,132,74,75,116].

Обработка воды Н-катионом предназначена для удаления всех катионов из воды и замены их ионами водорода. Вода за Н-катионитными фильтрами содержит избыточные ионы водорода и имеет по этой причине кислую реакцию, поэтому эта технология используется в сочетании с другими процессами ионизации – Na-катионированием или анионированием.



А – подвод исходной воды; Б – отвод обработанной воды; В – подвод воды на взрыхление; Г – сброс взрыхляющей воды; Д – подвод осветленной воды к Na- катионитному фильтру; Е – подвод регенерационного раствора; Ж – воздушники; И – сброс в дренаж; К – гидровыгрузка фильтрующего материала; Л – гидрозагрузка фильтрующего материала; М – сброс взрыхляющей воды и воздуха; N – насос исходной воды; П – осветленный фильтр; Р – Na- катионитный фильтр; S – растворный бак; T – эжектор; U – манометр; 1 – клапан байпаса насоса; 2 – клапан на линии подвода исходной воды на взрыхление; 3 – клапан на линии сброса в дренаж взрыхляющей воды из осветленного фильтра; 4 – клапан на линии подвода рабочей воды к эжектору и осветленной воды на Na- катионитный фильтр; 5 – клапан на линии подвода осветленной воды на Na- катионитный фильтр; 6 – клапан на линии подвода обработанной воды; 7 – клапан на линии подвода взрыхляющей воды на Na- катионитный фильтр; 8 – клапан на линии отвода отработанной воды; 9 – клапан на линии подвода концентрированного раствора соли к эжектору; 10, 11 – клапаны на линии пробоотборников; 12 – клапан на дренажной линии из осветленного фильтра; 13 – клапан на дренажной линии из Na- катионитного фильтра; 14 – клапан на линии сброса воздуха; 15 – клапан на линии сброса взрыхляющей воды и воздуха.

Рисунок 1.21 – Блочная водонагревательная установка ВПУ-1,0-М (с осветлительным фильтром) [60]

Трехступенчатые схемы химического опреснения используются для очистки дополнительной воды для прямооточных котлов и ядерных реакторов (рис.1.22), в котором в качестве третьей ступени используются фильтры смешанного действия (ФСД). Загрузка ФСД состоит из смеси (во фракциях от 2-1 до 1-2)

сильнокислого катионита в Н-форме и сильноосновного анионита в ОН-форме.

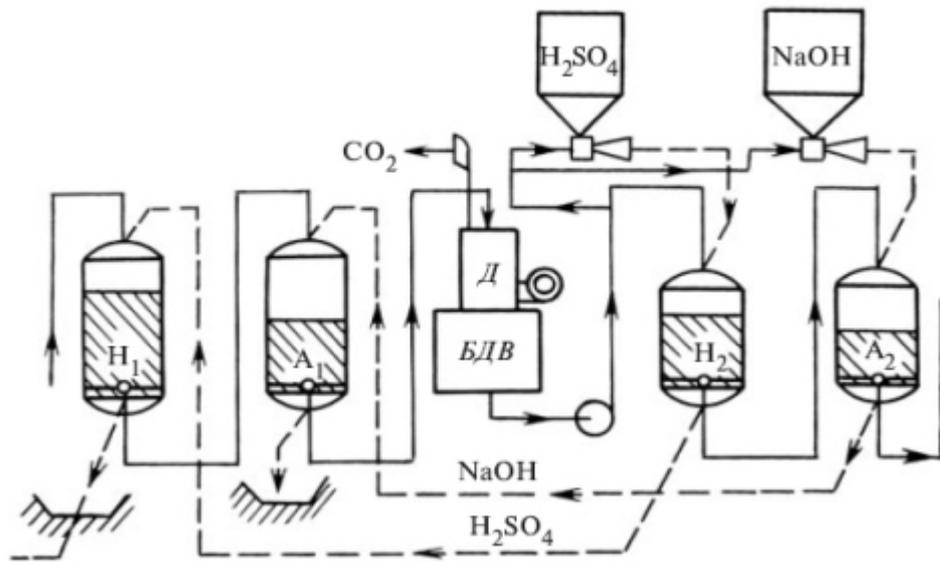


Рисунок 1.22 – Принципиальная схема двухступенчатого химического обессоливания [205]

Переходящие в раствор в процессах ионного обмена на чередующихся зернах катионита и анионита ионы H^+ и OH^- образуют воду, выводя из зоны ионного обмена противоионы и способствуя этим углублению степени обессоливания воды до остаточной удельной электропроводимости менее $0,2 \text{ мкСм/см}$.

Широко применяются технологии очистки воды для паровых и водогрейных котлов, систем водоснабжения, систем циркуляции горячей воды комплекса ОЭДФ-Zn и НТФ-Zn, позволяющие решать проблемы образования накипи, отложений и коррозионных повреждений в комплексе: не только в точке выработки тепла (котел, теплообменник), но и во всей системе [111].

1.3 Существующие физические методы и оборудование для воздействия на солеотложения

Если нарушается термическое или динамическое равновесие в термальном растворе, то возникают солеотложения, и тем сильнее, чем резче произошло это

нарушение. Химический состав минеральных отложений многообразен: карбонаты (кальцит, арагонит), окислы (лимонит, кремнезем), сульфиды (пирит, гидротроилит), самородные элементы (свинец, сера), сульфаты (гипс, ангидрит, барит). Отложение карбоната кальция является самым распространённым типом солеотложений. Безреагентные методы очистки воды: мембранные методы, методы обратного осмоса (гиперфильтрации), ультрафильтрация и электродиализ. В основе всех мембранных технологий лежит перенос примесей или растворителя (воды) через мембраны. Природа сил, вызывающих такой перенос, и строение мембран в названных процессах различны. При использовании сил давления при гипер- и ультрафильтрации мембраны должны пропускать молекулы воды, задерживая в максимальной степени ионы и молекулы примесей. При использовании электрических сил в электродиализном методе мембраны должны быть проницаемы для ионов и не должны пропускать молекулы воды. Схематически процессы прямого и обратного осмоса проиллюстрированы схемой, приведенной на рис. 1.23 [147].

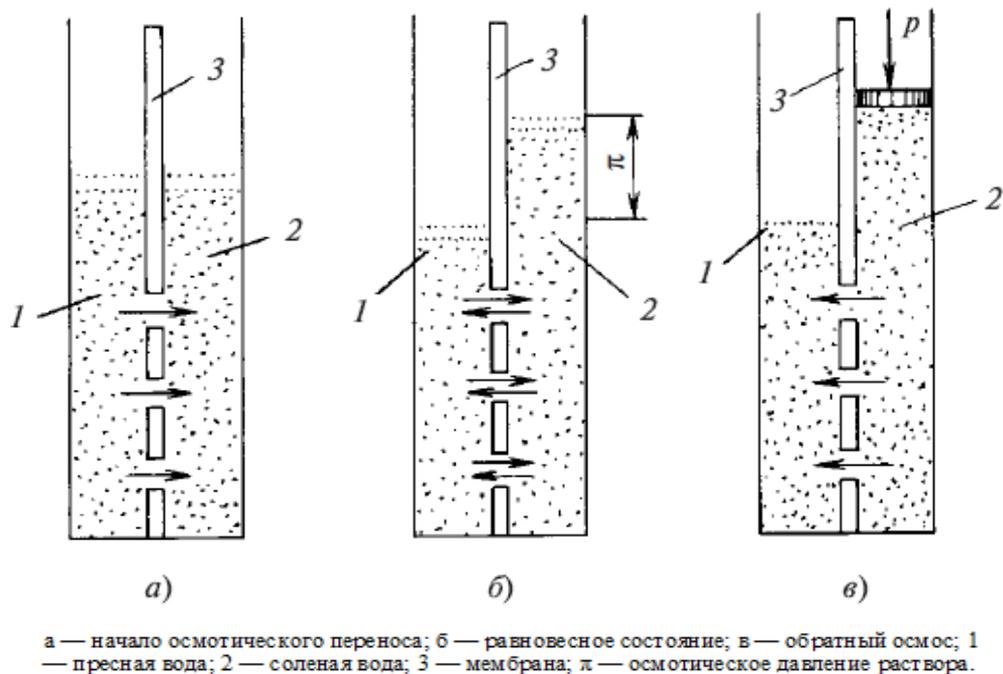


Рисунок 1.23 – Принципиальная схема прямого и обратного осмоса [147]

Электродиализ воды является своеобразным вариантом классического ме-

тогда ионного обмена с той разницей, что ионитный слой заменен в нём специальными ионообменными мембранами, а движущей силой процесса является внешнее электрическое поле. При наложении постоянного электрического поля на раствор в последнем возникает движение ионов растворенных солей, а также ионов H^+ и OH^- , причем катионы движутся к катоду, а анионы – к аноду [147].

Если в электродную ячейку поместить ионообменные мембраны: катионообменную, пропускающую только исключительно катионы, перемещающиеся к катоду, а в анодную – анионы, перемещающиеся к аноду. Сосредоточение ионов в средней камере будет снижаться и, наоборот, в приэлектродных камерах повышаться. Ток, проходящий через раствор, определяется в зависимости от природы растворенных веществ, их концентрации, характеристик мембран и подающегося напряжения. Обычно при электродиализе принято пользоваться плотностью тока, представляющей отношение силы тока через раствор к площади электрода. Плотность тока в растворе не должна превышать некоторого определенного значения, а именно: предельной плотности тока, выше которой начинается интенсивный перенос через раствор ионов H^+ и OH^- , а интенсивность переноса других ионов стабилизируется.

При практическом осуществлении процесса электродиализа затрачиваемое на перенос ионов количество электричества из-за потерь напряжения в ячейке на омическое сопротивление и на электродах превышает теоретически необходимое. Снижения этих потерь до 1–2% можно добиться, применяя многокамерные электродиализаторы. В этом случае электродиализный аппарат (рис. 1.24) состоит из большого числа тонких камер [147].

Магнитная обработка – это самый простой способ ограничить отложение солей. Магнитная технология воздействия на теплоноситель является безреагентным методом борьбы с накипью и отложениями. Принцип работы основан на том, что под действием магнитного поля ферромагнитные примеси воды увеличивают размеры конгломератов и адсорбируют карбонатные кристаллы на своей поверхности, в результате чего образование твердой фазы $CaCO_3$ происходит в толще воды, а не на поверхности нагрева. При магнитной обработке образуется

мелкодисперсная суспензия и ее уплотнение происходит не так быстро. Магнитная технология получила широкое распространение в теплоэнергетике благодаря сравнительной простоте используемых устройств, простым требованиям к их обслуживанию. При низких расходах очищенной воды используются устройства с постоянными магнитами и электромагнитами на общем сердечнике. В системах теплоснабжения с большим расходом теплоносителя применяются гидромагнитные устройства с электромагнитами, а также в водогрейных котлах, где загрязняющим компонентом являются оксиды железа [7].

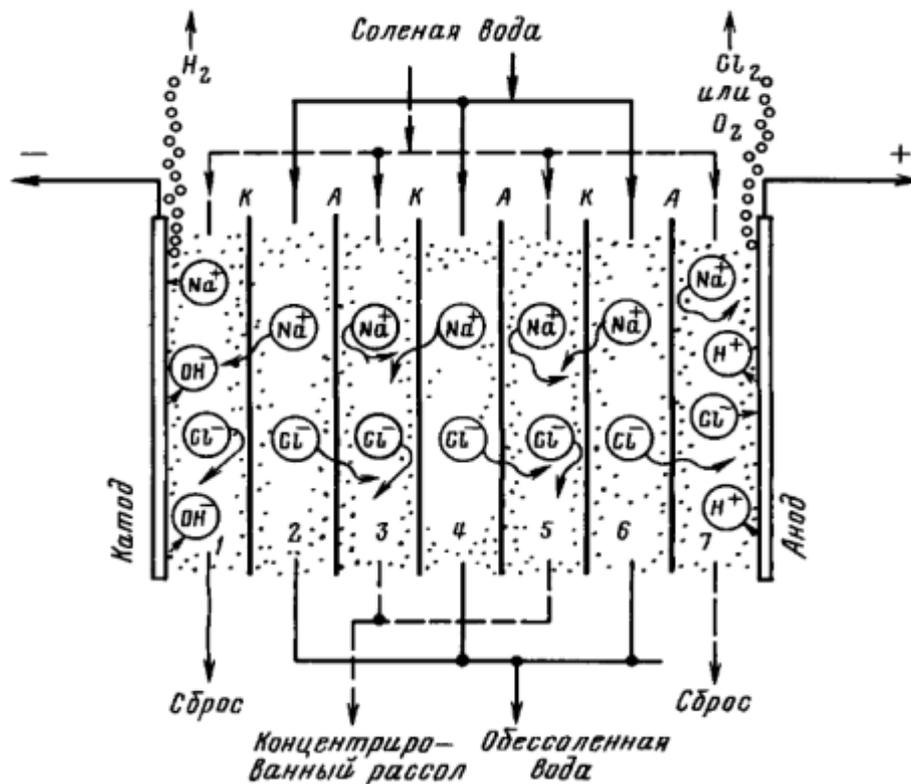


Рисунок 1.24 – Принципиальная схема многокамерного электродиализатора [147]

Проведённые исследования обнаружили, что процессом омагничивания можно управлять. Ощутимое уменьшение солеотложения происходит при ультразвуковой обработке геотермальной воды. При сочетании ультразвука с магнитной обработкой воды возможно достичь наилучшего эффекта.

рассматривая проблемы защиты водоемов от загрязнений В.Е. Терновцев предлагал «применять системы водоснабжения оборотного типа». Проблемы в работе оборотных систем связаны, в основном, с образованием накипи в трубо-

проводах, поэтому становятся актуальными различные методы предотвращения накипеобразования: реагентные (реагентная схема водообработки) и безреагентные (применение магнитного поля, ионный обмен и др.) [151].

Имеются разнообразные методы получения упругих колебаний звукового и ультразвукового диапазона частот. Для данной цели чаще всего употребляются генераторы на транзисторах и тиристорах, работающих в импульсном или непрерывном режиме. Первые нашли максимальное употребление в теплоэнергетике для предупреждения накипи, депарафинизации мазутопроводов, другие благополучно используются при ультразвуковой очистке изделий от разнообразных загрязнений, а также при сварке, диспергировании, эмульгировании, для интенсификации массообмена в химической технологии [149].

Г.В. Пирогов в статье «Применение ультразвука для ограничения накипеобразования в теплосетях», сопоставляя полученные зависимости интенсивности накипеобразования от времени, указывает, что происходит примерно одинаковая закономерность увеличения интенсивности накипеобразования по мере зарастивания теплообменной поверхности. Процесс зарастивания завершается примерно одинаково как с применением акустической обработки, так и без применения каких-либо мер для ограничения процесса накипеобразования. Время завершения составляет 30-40 ч. Однако, далее замечается спад интенсивности, определенный частичными сколами отложений. Отложения отслаиваются непосредственно от поверхности в виде чешуек толщиной порядка 170-180 мкм. В последующем оголенные участки поверхности вновь зарастают, причем значительно быстрее. Необходимо отметить, что в ходе экспериментов не было выявлено значимого воздействия ультразвука на свойства раствора: все измеряемые параметры оставались на прежнем уровне (рН, щелочность, жесткость). Наблюдаемое воздействие акустических колебаний подтверждает их механический характер: напряжение, появляющееся в металле под влиянием акустических колебаний и вызывающее видоизменение геометрических размеров, передаётся отложениям и приводит по достижении определенной толщины к их разрушениям. Обозначенный характер влияния акустических колебаний делает эту технологию малоэффективной в

условиях работы оборудования теплосетей. Поэтому в последующем изучалась возможность применения ультразвука как дополнение к коррекционной обработке сетевой воды антинакипинами [132].

В тоже время А.Г. Андреев, в статье «Применение акустических противонакипных устройств в малой энергетике» [11] высказывает мнение: «Из всех применяемых технологий по защите теплового оборудования от накипных отложений ультразвуковой метод является наиболее экономичным при высокой эффективности его применения. Ультразвуковая технология предотвращения образования накипи позволяет получить качественные показательные результаты работы за сравнительно небольшое время. Наиболее наглядно эффективность применения АПУ проявляется на кожухотрубных теплообменниках системы ГВС с артезианской водой, карбонатная жесткость которой составляет до 10 мг-экв/литр, при выходной температуре нагреваемой воды до 80°C. Работа теплообменника в таком режиме приводит к необходимости ежемесячной его остановки для проведения очистки теплообменных поверхностей. Толщина слоя накипи, образующегося за месяц работы теплообменника, достигает 3-5 мм.» [11].

В условиях относительно низкого давления и температуры, в водоводах, трубопроводах проточной системы интенсивность кристаллизации солей жесткости, содержащихся в растворе, существенно ниже, чем в котельном и теплообменном оборудовании. Протекание процесса кристаллизации подтверждает слой неорганических отложений на стенках труб.

Компания «Гидрофлоу» представляет запатентованную систему водоподготовки, базирующуюся на применении электромагнитных импульсов переменной частоты, создающих в трубе вторичное поле с эффектом «резонансной стоячей волны», которые формируются генератором высокочастотных колебаний. Генератор импульсов работает в диапазоне от 120 до 200 кГц. Генератор формирует импульсы переменной частоты, имеющие форму экспоненциально-затухающей синусоиды. Сигнал передаётся трубе ферритовым кольцом, закрепленным поверх её стенок. Кольцо изготовлено из специального ферросплава. Оно с высоким КПД передаёт сигнал стенкам трубы, которая в свою очередь, стано-

вится излучателем [211].

Итак, становится наглядной схожесть проблем водоподготовки для различных схем теплоснабжения. Анализ методов и оборудования подготовки воды для котлов в АПК позволяет сделать следующие выводы. Использование противонакипных устройств совместно с химической водоподготовкой позволяет уменьшить образование накипи на внутренних стенках теплоэнергетического оборудования и продлить срок службы водогрейных и паровых котлов.

С помощью акустической и магнитной обработки имеется возможность существенно замедлить образование неорганических отложений, в несколько раз снизить скорость внутренней коррозии, причём без остановок работы оборудования, без вмешательства в работу системы, без реагентов и вреда для экологии, т.к. устройства соответствующей мощности монтируются поверх трубопровода.

1.4 Анализ воздействия магнитных и других физических полей на воду и биосистемы

Анализ литературных источников показал:

- отсутствие единой точки зрения на сущность магнитной обработки и её место в научной методологии;
- отсутствие теоретических и экспериментальных обоснований расчета магнитных устройств в зависимости от качества воды.

Исследования в рассматриваемой области проводятся примерно в восьмидесяти институтах прикладного профиля, пока без необходимого участия институтов, разрабатывающих фундаментальные проблемы [98]. Несмотря на воспроизводимость опытов и большое возможное практическое значение, найденный эффект до сих пор не имеет объяснения [149]. В основе практического использования магнитной обработки водных систем лежат изменения их физических и физико-химических свойств [97]. Выявлению таких изменений посвящено множество работ, как в нашей стране, так и за рубежом. В Кубанском государственном

аграрном университете имени академика И. Т. Трубилина в области магнитной обработки жидкости работу проводили такие авторы, как: Н.И. Богатырев, Н.И. Катрич, А.В. Лопатченко, И.А. Потапенко, Г.И. Третьяков, Н.Н. Курзин, О.В. Вронский, В.К. Андрейчук, И.С. Белюченко, Р.Д. Тлиш, А.Г. Демьянченко, В.А. Белашов, А.С. Зотов, что подтверждено патентами Российской Федерации [15,16,17, 118-128]. 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. [32,56,130,131].

Проанализируем отдельные гипотезы исследователей. E.Schumann считает, что магнитное поле может воздействовать на зародыши кристаллов карбоната и сульфата кальция, иногда находящиеся в обрабатываемой воде, снижая количество солеотложений на поверхности нагрева.

С.И. Ремпель полагает, что «воздействие магнитного поля влияет главным образом на свойства ионов (не изменяя структуру воды), чем и обуславливаются противонакипные свойства воды, обработанной магнитным полем» [137].

Компания «Hydropath» разработала технологию воздействия электрического поля на воду, используя подход, основанный на принципе электрического трансформатора. Основатель компании доктор Дэнни Стефанини из Ноттингема (Великобритания) разработал теорию кристаллизации согласно которой: «радиально направленное электромагнитное поле притягивает свободные электроны внутри стенки трубы от внутренней поверхности к внешней, поэтому внутренняя поверхность трубы приобретает слабый положительный заряд. Ионы кальция, растворенные в воде, тоже имеют положительный заряд. Они не могут осесть на стенках трубы, отталкиваются от одноименно заряженных стенок по направлению к оси трубы. В воде, наряду с положительно заряженными ионами, также присутствуют отрицательно заряженные ионы, например гидрокарбонаты. Под воздействием электромагнитных импульсов происходит образование свободных кластеров. Свободный кластер – это сгусток ионов, каждый из которых окружён молекулами воды. Ионы в кластере располагаются хаотично, расстояние между

ними неоднородны. Электромагнитные импульсы, направленные вдоль оси трубы, заставляют положительно и отрицательно заряженные ионы совершать колебательные движения. При этом происходит упорядочивание свободных кластеров, ионы в них перераспределяются в пространстве в соответствии со своими электрическими зарядами так, как если бы ионы располагались в кристалле. Происходит выравнивание расстояний между ними. Из кластера вытесняется часть молекул воды. Теперь кластер готов к кристаллизации [211].

В.И. Миненко в работе [110] выдвигает гипотезу о том, что магнитная обработка может оказывать влияние на гидратацию ионов водных систем. По мнению Миненко В.И., магнитное поле влияет на воду следующим образом: «под влиянием внешнего магнитного поля изменяется плотность электронных облаков ионов с молекулами воды, составляющими непосредственное окружение ионов и изменение поляризации ионами близлежащих объемов воды, т.е. изменение структуры раствора». Выдвинутая гипотеза об изменении физических свойств электролита в магнитном поле, основывается на наблюдениях поверхностного натяжения, вязкости и электросопротивления. Но данные изменения, по мнению автора, «не могут быть использованы для расчета параметров магнитных аппаратов».

По мнению Лапотышкина Н.П., [101] «магнитное поле влияет на степень гидратации ионов накипеобразователей, растворенных в воде, что обуславливает образование многочисленных зародышей кристаллов и стабилизирует выделяющуюся при нагревании твердую фазу». А.Н. Киргинцев и В.М.Соколов [69] считают, что «под действием магнитного поля вода приобретает особые свойства, которые связаны с железом, обычно присутствующим в большем или меньшем количестве в природной воде».

А.И. Шахов, С.С. Душкин объясняют роль магнитного поля «коагуляцией органических и минеральных коллоидов за счет дегидратации двойного электрического слоя ионов и снижения дзета-потенциала, что в свою очередь нарушает агрегативную устойчивость коллоидов и ускоряет их «слипание»»[98].

Подобным образом, мнения и предположения разнообразных авторов в главном опираются на поляризующем влиянии магнитного поля на ионы и моле-

кулы воды.

Е.Ф. Тебенихин устанавливает ряд оснований, которые препятствуют расширению применения магнитного поля в водоподготовке следующим образом [149]: «...не полностью раскрытая физическая сущность явлений и плохая воспроизводимость эффектов свидетельствуют о недостаточном знании основных факторов, влияющих на этот процесс, нет надежных и оперативных методов контроля и оценки эффективности процесса; конструкции применяемых приборов не поддаются строгому расчету».

В работе [29] использовали источник переменного магнитного поля в виде одной горизонтальной кольцевой катушки. Это позволило иметь на разном удалении от кольца сразу ряд величин переменного магнитного поля одной частоты в одном эксперименте. Такая конструкция источника поля создаёт относительно сильные градиенты магнитного поля в области размещения биологических проб. Во многих научных работах сообщают о биологической эффективности в ряде случаев именно градиентов магнитного поля. В этих работах совпадали величины эффекта при одинаковых значениях амплитуды магнитного поля, но при разных уровнях градиентов. В отсутствие установленных механизмов действия магнитного поля, вопрос о допустимости использования градиентных полей в экспериментах такого плана остаётся открытым.

На растительные объекты оказывает воздействие также электрическая компонента электромагнитного поля. Например, в опытах с тепличными растениями обнаружено позитивное воздействие электрических полей, образуемых электродами, на рост, урожайность и сроки их формирования [71].

В.Г. Сазыкиным [140] предложена классификация различных приёмов воздействия электричества на растительные объекты, позволяющая выбрать наиболее эффективные способы электротехнологии. На данный момент разработаны способы и средства электронно-ионной технологии для гидропонного растениеводства. Предложена комплексная электрообработка в постоянных электрических полях различной напряженности, и разработана электродная система для ее реализации; установлена закономерность, отражающая изменение напряженности

электростатического поля в слое семян в зависимости от их диэлектрической проницаемости [21].

Работы в этой области проводились в Ленинградском Институте инженеров водного транспорта (Н.К. Лопырев), в Одесском политехническом институте (А.М. Аксельбанд), в Москве – заводом «Котлоочистка» (Ю.Е. Морозов), Институтом горючих ископаемых (ИГИ) (Е.П. Медников, В.Ю. Николаев, Е.Ф. Тебенихин), а в последнее время Московским специализированным пусконаладочным управлением треста «Оргпищепром» (В.С. Старовойтов) и ВНИЭКИ ПРОДМАШ (Ю.А. Копылов) [149]. Рассмотрим подробнее направления исследований.

Влияние магнитных аппаратов на водные растворы. Согласно СНиП 11-35-76 “Котельные установки”, магнитную обработку воды для теплооборудования и водогрейных котлов целесообразно проводить, если содержание ионов железа Fe^{2+} и Fe^{3+} в воде не превышает 0,3 мг/л, кислорода - 3 мг/л, постоянная жесткость ($CaSO_4$, $CaCl_2$, $MgSO_4$, $MgCl_2$) - 50 мг/л, карбонатная жёсткость ($Ca(HCO_3)_2$, $Mg(HCO_3)_2$) не выше 9 мг-экв/л, а температура нагрева воды не должна превышать 95 °С. Для питания паровых котлов – стальных, допускающих внутрикотловую обработку воды, и чугунных секционных – использование магнитной технологии обработки воды возможно, если карбонатная жёсткость воды не превышает 10 мг-экв/л, содержание Fe^{2+} и Fe^{3+} в воде - 0,3 мг/л, при поступлении воды из водопровода или поверхностного источника [210]. Воздействие магнитного поля на воду носит комплексный многофакторный характер и влияет на изменение структуры воды, гидратированные ионы, физико-химические свойства и поведение растворённых в ней неорганических солей [210]. При воздействии на воду магнитного поля в ней изменяются скорости химических реакций за счет протекания конкурирующих реакций растворения и осаждения растворенных солей, происходит образование и распад коллоидных комплексов, улучшается электрохимическая коагуляция с последующей седиментацией и кристаллизацией солей [210]. Существует три основных взаимодополняющих группы гипотез механизма воздействия магнитного поля на воду, это коллоидная, ионная и водная. Первые предполагают, что под влиянием магнитного поля в обрабатываемой воде проис-

ходит спонтанное образование и распад коллоидных комплексов ионов металлов, фрагменты распада которых формируют центры кристаллизации неорганических солей, что ускоряет их последующую седиментацию [210].

Гипотезы второй группы объясняют действие магнитного поля поляризацией растворённых в воде ионов и деформацией их гидратных оболочек, сопровождающаяся уменьшением гидратации – важного фактора, обуславливающего растворимость солей в воде, электролитическую диссоциацию, распределение веществ между фазами, кинетику и равновесие химических реакций в водных растворах, в свою очередь повышающей вероятность сближения гидратов ионов и процессы седиментации и кристаллизации неорганических солей [210].

Гипотезы третьей группы постулируют, что магнитное поле за счет поляризации дипольных молекул воды оказывает воздействие непосредственно на структуру ассоциатов воды, образованных из множества молекул воды, связанных друг с другом посредством низкоэнергетичных межмолекулярных ван-дер-ваальсовых, диполь-дипольных и водородных связей, что может привести к деформации водородных связей и их частичному разрыву, миграции подвижных протонов H^+ в ассоциативных элементах воды и перераспределению молекул воды во временных ассоциативных образованиях молекул воды – кластерах общей формулы $(H_2O)_n$, где n по последним данным может достигать от десятков до нескольких сотен единиц [210]. Эти эффекты в совокупности могут привести к изменению структуры воды, что обуславливает наблюдаемые изменения её плотности, поверхностного натяжения, вязкости, значения рН и физико-химических параметров протекающих в воде процессов, в т. ч. растворения и кристаллизации растворённых в воде неорганических солей [210]. В результате содержащиеся в воде магниевые и кальциевые соли теряют способность формироваться в виде плотного отложения - вместо карбоната кальция $CaCO_3$ образуется более щадящая мелкокристаллическая полиморфная форма $CaCO_3$, по структуре напоминающая арагонит, который или совсем не выделяется из воды, поскольку рост кристаллов останавливается на стадии микрокристаллов, или выделяется в виде тонкодисперсной взвеси, скапливающейся в грязевиках или отстойниках.

Механизм воздействия магнитного поля на накипь нельзя считать окончательно установленным, несмотря на то, что магнитные аппараты в истечение ряда лет находят практическое применение [149]. Все магнитные аппараты, по мнению Г.В. Никитенко, оказывают влияние на водные растворы: «Наличие накипи на внутренних стенках теплообменных устройств и трубопроводов приводит к снижению теплопередачи, уменьшению проходного сечения труб, перерасходу топлива, сокращению срока эксплуатации и производительности используемого оборудования... Очистка аппаратуры от накипи весьма трудоемкий и дорогостоящий процесс, связанный с изменением режима работы тепловых аппаратов, с покупкой и применением химических реагентов, изменяющих солевой состав водного раствора, а также использованием специальной службы, следящей за составом и качеством обрабатываемой воды... Большинство котельных агропромышленного комплекса из-за остаточного финансирования, как правило, не имеют службы, отвечающей за химическую водоподготовку, и не производят закупку химических реагентов, что ведет к резкому снижению срока эксплуатации котлов и котельного оборудования. Анализ использования указанных методов для борьбы с отложениями солей на стальных поверхностях теплообменного оборудования приводит к выводу, что в существующих условиях для котельных АПК приемлем один из самых дешевых и эффективных способов борьбы с накипью, магнитная обработка воды. Все остальные способы требуют значительных материальных и трудовых затрат. Ориентировочные расчеты показывают, что для вод среднего качества (жесткость 5мг-экв/кг) стоимость обработки 1м³ воды при помощи противонакипных устройств обходится в 200-250 раз дешевле химической обработки. Аппараты магнитной обработки воды могут генерировать затравочные кристаллы накипеобразователей, что изменяет характер отложений на теплопередающих поверхностях» [111].

Влияние ультразвука на биомакромолекулы в растворах. Лучше всего изучено действие ультразвука на водные растворы аминокислот, оснований, белков и нуклеиновых кислот [5]. Аминокислоты в поле интенсивного ультразвука в течение нескольких часов синтезируются из более простых веществ и сами испыты-

вают существенные химические превращения. Ультразвук заметно влияет на структуру и функции белков и нуклеиновых кислот. Эти изменения зависят от размеров и форм молекул, от природы присутствующих в растворе посторонних веществ и параметров ультразвукового поля.

Херцик, Хрдличка и Шприндрих [177] действовали ультразвуком с частотой 3500 $\kappa\Gamma\text{ц}$ на эпидермис лука, причем объект в капле жидкости помещался непосредственно на колеблющийся кварц. Сразу же после начала облучения в ядре клетки происходят цитологические изменения, оно гиалинизируется, ядрышки становятся более заметными. Спустя некоторое время, ядро клетки разрывается и остатки его сморщиваются. Движение протоплазмы ускоряется, и в ней увеличивается число хорошо различимых гранул.

Ямаха и Уэда [196] при облучении клеток кончика корешка фасоли (*Vicia Faba*) обнаружили разнообразные нарушения строения клетки и течения митоза, «например, образование вакуолей, сморщивание плазмы, расщепление клеточной оболочки, склеивание, фрагментацию и набухание хромосом». «Аналогичные опыты поставил Селман [192] на кончиках корешка лука, куриных зародышах и пыльце традесканции».

Уоллес, Башнелл и Ньюкамер [198] подвергли облучению ультразвуком с частотой 400 $\kappa\Gamma\text{ц}$ корешки репчатого лука и нарцисса, а также ростки подсолнечника. На всех стадиях деления ядра были отмечены изменения хромосом, выражавшиеся в разрывах, перетяжках, слипаниях и других нарушениях структуры. Лежащие ядра также часто демонстрировали небольшие явления распада, в некоторых клетках ядерные оболочки рвались.

Если производилось облучение точки роста побегов подсолнечника, то при образовании семян обнаруживались фенотипические изменения: так, наблюдался чрезмерный рост (гипертрофия), утолщение и сморщивание листьев, т. е. изменения, напоминающие эффект, вызываемый воздействием колхицина. Яги [197], Херш, Каррер и Лумис [178], а также Вирсинский [169] проводили опыты по вызыванию мутаций или изменению роста растений при помощи ультразвука. Еще большее количество проведение исследования было посвящено облучению ульт-

тразвуком семян с целью влияния на их прорастание и последующий рост растений (обзор этих работ можно найти у Гессе) [27]. В 1936 г. Истомина и Островский [27] установили, что после облучения ультразвуком ($f = 400 \text{ кГц}$) семян картофеля вес клубней вырос на 25 – 45%, а вес листьев снизился на 33% по сравнению с весом листьев необлученных растений.

Давыдов [27] сообщает об увеличении на 50% веса корней сахарной свеклы при облучении семян этого растения. Семена подвергали воздействию ультразвука с частотой 425 кГц как в ненабухшем, так и в набухшем состоянии. Если предварительно набухшие семена облучали в течение 2–4 мин, высушивали и снова высевали по прошествию 55 дней, то было отмечено увеличение веса свеклы на 22–45%. Штокебрандт [27] повторил опыты Давыдова на сахарной свекле в большем масштабе и не обнаружил какого-либо положительного влияния ультразвука на прорастание семян и рост растений. Лоза [27], воспроизведший данные эксперименты на рисе, горохе, сое и редисе, также не увидел никакой стимуляции прорастания. К таким же негативным итогам при облучении ультразвуком семян и ростков редиса пришел и Берси [27]. Напротив, Берентс [27] заявляет об форсировании прорастания семян гороха при облучении ультразвуком с частотой 800 кГц; всё же спустя 170 часов рост облученных семян затормаживался, и они гибли. Хаскелл и Селман [27] не могли выявить ускорения прорастания или развития при облучении кукурузы ультразвуком с частотой 1 МГц. Однако, Швабе и Торнли [27], получили после воздействия на ненабухшие семена озимой ржи ультразвуком с частотой 1 МГц ускорение прорастания, но не обнаружили никакого влияния на рост. Томберг [27] после облучения кресса ультразвуком с частотой 800 кГц ($=0,4 \text{ Вт/см}^2$) не нашел ни повышения способности семян к прорастанию, ни изменения времени прорастания. Наоборот, при повышении энергии облучения ($J=2 \text{ Вт/см}^2$) обе эти величины уменьшались. Брюнер и риндфлейш [68] также исследовали воздействие ультразвука на прорастание и рост гороха. При времени облучения 15 мин было выявлено соразмерное уменьшение длины всходов и корней до 20% по отношению к необлученным, что сви-

детельствует о присутствии повреждения. Способность к прорастанию по сравнению с контрольными семенами едва лишь незначительно меняется при облучении в течение не более 20–25 мин, при более продолжительном действии ультразвука данная способность стремительно падает. Опыты Рубана и Долгополова [139] показали, что у облученных в воде семян пшеницы, овса и конопли наблюдается небольшое ускорение прорастания; авторы связывают это с увеличением способности к набуханию, усиленным пропитыванием семян водой, а также с активацией ферментов. По-видимому, облученные семена дают и более высокий урожай, что отмечает Глаузер [27], который облучал ультразвуком с частотой 800 кГц набухшие и не набухшие семена. Влияние тепловых эффектов при различной частоте ультразвука исследовал на проростках гороха Либл [27]. Шмидт-Римплер [27] выявил максимальное увеличение роста проростков гороха при облучении ультразвуком с частотой 175 кГц и задержку роста при более высоких частотах. Мартинек [27] при облучении семян проса ультразвуком с частотой 3,3 МГц не нашел никакого влияния на рост. Замечания по качеству оценки показывают, что магнитное излучение улучшает общие физические характеристики плодов, поэтому увеличивает их потенциал на рынке. Эта технология была одобрена независимой научной оценкой, проведенной в течение августа 1993 года [201].

1.5 Анализ математических уравнений, описывающих электромагнитные поля

В разработку теории электромагнитного поля внесли свой вклад такие учёные как М. Фарадей, Д. Максвелл, Г. Герц, А. Эйнштейн, М. Планк. Э. Х. Ленц произвел открытие закон индукции, закономерности выделения тепла в проводнике, при протекании по нему тока. Михаил Михайлович Филиппов изучал коротковолновые электромагнитные излучения. Пётр Николаевич Лебедев исследовал электромагнитные волны, подтвердил давление света на твердые тела. Профессор Аркадьев В.К., исследуя железо и никель, впервые в мире наблюдал гиромангнитный (ферромагнитный) резонанс. Работы в области квантовой электроди-

намики в её современном виде, принадлежат ряду ведущих физиков, среди которых можно выделить Бозе, Бора, Гейзенберга, Де-Бройля, Дирака, Фейнмана, Швингера, Томонагу.

Распространение электромагнитных волн в ферритах. Ферриты проявляют огромное многообразие физические свойств. Изменяя состав и режим обработки ферритов, можно в очень широких пределах изменять их магнитные свойства. Основное преимущество ферритов перед металлическими ферромагнетиками состоит в том, что они обладают высоким удельным сопротивлением. В результате ферриты практически не имеют потерь на вихревые токи, однако электромагнитные волны в ферритах распространяются с некоторым затуханием, при этом появляется ряд существенных особенностей, для понимания которых необходимо дать ряд пояснений. Электромагнитные волны распространяются в ферритах с довольно малым затуханием, имеют при этом ряд важнейших особенностей. Покажем, что феррит, намагниченный постоянным полем $\mathbf{H}_= = z_0 H_=$, для переменного электромагнитного поля обладает магнитной проницаемостью вида

$$\vec{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_p & -j\alpha & 0 \\ j\alpha & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{pmatrix}, \quad (1.1)$$

где μ_p, μ_z – комплексные величины, мнимые части которые характеризуют различные виды магнитных потерь (тензор $\vec{\mu}$ применяется к комплексным амплитудам). В отсутствии «подмагничивающего» поля $\mathbf{H}_=$ феррит изотропен, тогда $\alpha = 0$ и $\mu_p \mu = \mu_z$.

Поле $\mathbf{H}_=^0$, при котором магнитные потери обладают резко выраженным максимумом, соответствуют так называемому «ферромагнитному резонансу», наблюдаемому при частоте $f^0 = \gamma_c H_=^0$, (постоянная $\gamma_c = 0,035 \frac{\text{МГц}}{\text{а}\cdot\text{м}^{-1}}$).

При изменении направления поля $\mathbf{H}_=$ на обратное компонента α изменяет знак. Рассмотрим характерные свойства распространяющихся в намагниченном феррите электромагнитных волн. С этой целью запишем в декартовых координатах уравнения Максвелла, принимая во внимание характер магнитной проницае-

мости феррита (1.1) [112]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial y} - \frac{\partial \dot{H}_y}{\partial z} = J\omega\epsilon\dot{E}_x; \\ \frac{\partial \dot{H}_x}{\partial z} - \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial x} = J\omega\epsilon\dot{E}_y; \\ \frac{\partial \dot{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \dot{H}_x}{\partial y} = J\omega\epsilon\dot{E}_z \end{cases} \quad (1.2)$$

и

$$\begin{cases} \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \dot{E}_y}{\partial z} = -j\omega(\mu\dot{H}_x - j\alpha\dot{H}_y); \\ \frac{\partial \dot{E}_x}{\partial z} - \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial x} = -j\omega(j\alpha\dot{H}_x - \mu\dot{H}_y); \\ \frac{\partial \dot{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \dot{E}_x}{\partial y} = -j\omega\mu_z\dot{H}_z. \end{cases} \quad (1.3)$$

Допустим, что электромагнитная волна распространяется вдоль направления постоянного магнитного поля $\mathbf{H}_=$ (ось z). Полагая $\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} = 0$, из (1.2 и 1.3) видим, что волна продольных компонент не имеет. Таким образом,

$$\dot{\mathbf{H}} = (x_0\dot{H}_{0x} - y_0\dot{H}_{0y})e^{-i(\omega t - \Gamma z)} \text{ и } \dot{\mathbf{E}} = (x_0\dot{E}_{0x} - y_0\dot{E}_{0y})e^{-i(\omega t - \Gamma z)}, \quad (1.4)$$

где Γ – искомое комплексное волновое число; ω – циклическая частота; $\dot{\mathbf{H}}$ – комплекс напряжённости магнитного поля; $\dot{\mathbf{E}}$ – комплекс напряжённости электрического поля; t – время; x, y, z – координаты, в направлении которых распространяется волна.

Внося в записанные выше уравнения Максвелла компоненты поля

$\dot{H}_x = \dot{H}_{0x}e^{-i(\omega t - \Gamma z)}$, $\dot{H}_y = \dot{H}_{0y}e^{-i(\omega t - \Gamma z)}$ и т.д., определяемые из (1.4), имеем:

$$\begin{cases} \Gamma\dot{H}_{0y} = \omega\epsilon\dot{E}_{0x} & \Gamma\dot{E}_{0y} = -\omega(\mu\dot{H}_{0x} - j\alpha\dot{H}_{0y}) \\ \Gamma\dot{H}_{0x} = \omega\epsilon\dot{E}_{0y} & \Gamma\dot{E}_{0x} = \omega(j\alpha\dot{H}_{0x} + \mu\dot{H}_{0y}) \end{cases} \quad (1.5)$$

где ϵ – деформация; μ – магнитная проницаемость; α – угол запаздывания при внешней периодической силе деформации относительно заданной силы.

Уравнения (1.2 и 1.3) обращаются в тождество ($0 \equiv 0$).

Исключая из (1.5) \dot{E}_{0x} и \dot{E}_{0y} , находим:

$$\begin{cases} (\Gamma^2 - \omega^2\epsilon\mu)\dot{H}_{0y} = j\omega^2\epsilon\alpha\dot{H}_{0x}, \\ (\Gamma^2 - \omega^2\epsilon\mu)\dot{H}_{0x} = -j\omega^2\epsilon\alpha\dot{H}_{0y} \end{cases} \quad (1.6)$$

Отсюда вытекает равенство

$$(\Gamma^2 - \omega^2 \epsilon \mu)^2 = \omega^4 \epsilon^2 \alpha^2, \quad (1.7)$$

из которого определяется волновое число:

$$\Gamma^2 = \omega^2 \epsilon (\mu \pm \alpha). \quad (1.8)$$

Оно имеет два значения

$$\Gamma^+ = \omega \sqrt{\epsilon(\mu + \alpha)} \text{ и } \Gamma^- = \omega \sqrt{\epsilon(\mu - \alpha)}. \quad (1.9)$$

Следовательно, существуют два рода волн с различными фазовыми скоростями

$$v^+ = 1/Re \sqrt{\epsilon(\mu + \alpha)} \text{ и } v^- = 1/Re \sqrt{\epsilon(\mu - \alpha)}. \quad (1.10)$$

Эквивалентная магнитная проницаемость среды для волн различна и принимает значения

$$\mu_3^+ = \mu + \alpha \text{ и } \mu_3^- = \mu - \alpha. \quad (1.11)$$

Соотношение комплексных амплитуд компонент вектора H двух родов волн:

$$\dot{H}_{0y} = \pm j \dot{H}_{0x}. \quad (1.12)$$

Компоненты H_y и H_x равны по амплитуде и сдвинуты по фазе на $\pm 90^\circ$, отсюда следует, что волны, распространяются со скоростями $v \pm$, поляризованы по кругу в разных направлениях. В соответствии с (1.4) запишем [112]:

Правая поляризация:

$$\dot{\mathbf{H}}^+ = H_0(x_0 + jy_0)e^{j(\omega t - \Gamma z)}. \quad (1.13)$$

Левая поляризация:

$$\dot{\mathbf{H}}^- = H_0(x_0 - jy_0)e^{j(\omega t - \Gamma z)}, \quad (1.14)$$

с учётом уравнений (1.6):

$$\dot{\mathbf{E}}^+ = W^{0+} H_0(jx_0 - y_0)e^{j(\omega t - \Gamma z)}, \quad (1.15)$$

$$\dot{\mathbf{E}}^- = W^{0-} H_0(-jx_0 - y_0)e^{j(\omega t - \Gamma z)}, \quad (1.16)$$

где

$$W^{0\pm} = \sqrt{(\mu \pm \alpha)/\epsilon} \quad (1.17)$$

– волновое сопротивление для волн двух родов.

Допустим, что в среде в то же время имеются волны правой и левой поля-

ризации равной амплитуды, и для простоты проигнорируем потери. Тогда, поляризация в каждой точке будет линейной. Складывая поля (1.13) в начале координат ($z=0$), получим:

$$\dot{\mathbf{H}}_m(0) = \dot{\mathbf{H}}_m^+(0) + \dot{\mathbf{H}}_m^-(0) = x_0 2H_0, \quad (1.18)$$

что соответствует вертикально поляризованной волне.

Так как волны противоположной круговой поляризации распространяются с разными скоростями ($v^+ = 1/\sqrt{\epsilon(\mu + \alpha)}$ и $v^- = 1/\sqrt{\epsilon(\mu - \alpha)}$), то векторы \mathbf{H}^+ и \mathbf{H}^- на одном и том же расстоянии от начала координат $z = l$ окажутся повернутыми на разные углы (рис.1.25) и, складываясь, дадут волну линейной поляризации, плоскость которой также будет повернута относительно начального положения.

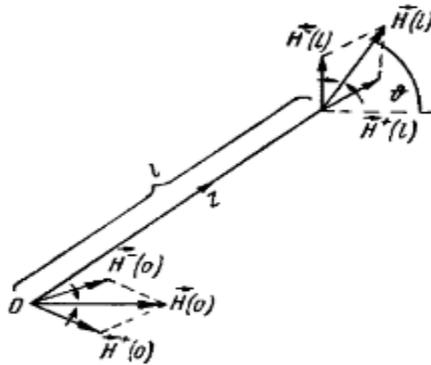


Рисунок 1.25 – Схема соотношения векторов \mathbf{H}^+ и \mathbf{H}^- для одного расстояния $z = l$ от начала координат

Поле \mathbf{H} , соответствующее при $z = 0$ вертикально поляризованной волне, при $z = l$ имеет вид [112]:

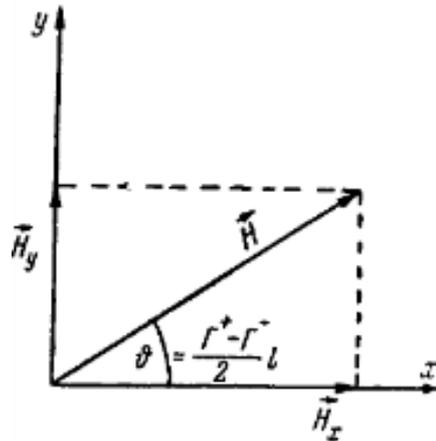
$$\dot{\mathbf{H}}_m(l) = \dot{\mathbf{H}}_m^+(l) + \dot{\mathbf{H}}_m^-(l) = H_0 [x_0 (e^{-j\Gamma^+ l} + e^{-j\Gamma^- l}) + jy_0 (e^{-j\Gamma^+ l} - e^{-j\Gamma^- l})], \quad (1.19)$$

или, после простых преобразований

$$\dot{\mathbf{H}}_m(l) = 2H_0 e^{-j\frac{\Gamma^+ + \Gamma^-}{2} l} (x_0 \cos \frac{\Gamma^+ - \Gamma^-}{2} l + y_0 \sin \frac{\Gamma^+ - \Gamma^-}{2} l). \quad (1.20)$$

Поворот вектора $\vec{\mathbf{H}}$ (и плоскости поляризации) составил (рис.1.26)

$$v = \frac{\Gamma^+ - \Gamma^-}{2} l \text{ [рад]}. \quad (1.21)$$

Рисунок 1.26 – Схема поворота вектора \vec{N}

Линейно поляризованная волна распространяется в намагниченном феррите вдоль направления постоянного поля $\mathbf{H}_=$ с вращением плоскости поляризации (эффект Фарадея).

Величина

$$\Psi = \frac{\Gamma^+ - \Gamma^-}{2} = \frac{\omega\sqrt{\epsilon}}{2} (\sqrt{\mu + \alpha} - \sqrt{\mu - \alpha}), \quad (1.22)$$

это постоянная Фарадея, а среда – гиротропная.

Кроме намагниченного феррита, заметными гиротропными свойствами обладает, например, намагниченный ионизированный газ, однако в этом случае не магнитная, а диэлектрическая проницаемость среды описывается тензором вида

$$\vec{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon & -j\beta & 0 \\ j\beta & \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{pmatrix}. \quad (1.23)$$

Эффект Фарадея необратим. Если рассмотреть направления распространения волны, совпадающие вдоль поля $\mathbf{H}_=$, то при $\alpha > 0$ плоскость поляризации будет вращаться по часовой стрелке (постоянная Фарадея положительна); при распространении волны против направления $\mathbf{H}_=$ изменится знак компоненты α и постоянной Фарадея. Наблюдая уходящую волну, мы обнаружим вращение её плоскости поляризации, совершающееся против часовой стрелки. Характер распространения волны в гиротропной среде зависит, таким образом, от направления – поле в среде не подчиняется теореме взаимности.

Рассмотрим волну, электрический вектор которой параллелен постоянному полю $\mathbf{H}_=(\mathbf{E} = z_0 E_z)$, распространяющуюся в перпендикулярной ему плоскости (эффект Коттона-Мутона), например, вдоль оси Ox . Полагая в уравнениях (1.2),(1.3) $E_x = E_y = 0$ и $\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} = 0$, имеем

$$\begin{cases} \Gamma \dot{H}_{0y} = -\omega \epsilon \dot{E}_{0z}; \\ \mu \dot{H}_{0x} = j\alpha H_{0y}; \\ \Gamma \dot{E}_{0z} = -\omega(j\alpha \dot{H}_{0x} + \mu \dot{H}_{0y}). \end{cases} \quad (1.24)$$

Вторая строка показывает, что исследуемая линейно поляризованная волна имеет компоненту магнитного вектора (H_x), совпадающую с направлением распространения и сдвинутую относительно поперечной компоненты H_y по фазе на 90° . Вектор \vec{H} линейно поляризованной волны, таким образом, вращается, скользя своим концом по эллипсу в плоскости xOy , в этом случае говорят, что магнитное поле волны эллиптически поляризовано [112].

Исключая из (1.24) \dot{E}_{0z} , получим:

$$\begin{cases} \Gamma^2 \dot{H}_{0z} = \omega^2 \epsilon (j\alpha \dot{H}_{0x} + \mu \dot{H}_{0y}) \\ \mu \dot{H}_{0x} = j\alpha H_{0y}, \end{cases} \quad (1.25)$$

откуда

$$\Gamma^2 = \omega^2 \epsilon (\mu^2 - \alpha^2) / \mu. \quad (1.26)$$

Эквивалентная магнитная проницаемость во взаимно перпендикулярных плоскостях

$$\mu_{\perp} = \frac{\mu^2 - \alpha^2}{\mu}, \quad (1.27)$$

квадратична относительно компоненты тензора магнитной проницаемости α и, следовательно, не изменяется в зависимости от знака постоянного поля $H_=-$.

Допустим, что электрический вектор волны, распространяющийся вдоль оси x , перпендикулярен к постоянному полю $H_=(E = y_0 E_y)$. Тогда из (1.25) следует:

$$\begin{cases} \Gamma \dot{H}_{0z} = \omega \epsilon \dot{E}_{0y} \\ \Gamma \dot{E}_{0y} = \omega \mu_z \dot{H}_{0z}, \end{cases} \quad (1.28)$$

откуда

$$\Gamma^2 = \omega^2 \epsilon \mu_z. \quad (1.29)$$

Полученный результат показывает, что мы имеем дело с обычной волной свободного пространства (рис.1.27) при магнитной проницаемости μ_z .

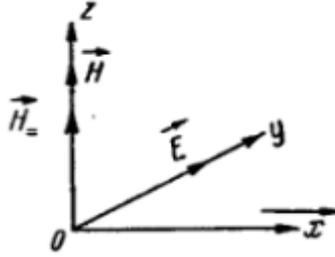


Рисунок 1.27 – Схема волны свободного пространства при магнитной проницаемости μ_z

В гиротропной среде скорость распространения линейно поляризованной волны в направлении, перпендикулярном полю H_z , зависит от её поляризации (рис. 1.28).

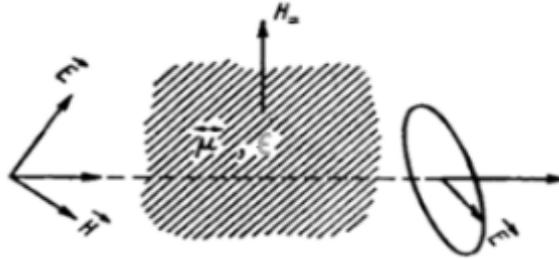


Рисунок 1.28 – Схема входящей в гиротропную среду волны

Входящую в гиротропную среду волну произвольной линейной поляризации следует рассматривать как совокупность двух волн, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях и распространяющихся со скоростями.

$$v_{\perp} = 1/Re \sqrt{\epsilon\mu_{\perp}} \text{ и } v_{\parallel} = 1/Re \sqrt{\epsilon\mu_z}. \quad (1.30)$$

При выходе из гиротропной среды эти волновые компоненты окажутся в разных фазах и образуют волну эллиптической поляризации (эффект Коттона-Мутона).

Если создать внутри феррита магнитное поле, обеспечивающего резонанс, и поместить такую систему в металлическую оболочку, то электрическая составляющая падающей волны внутрь не пройдет, а магнитная составляющая беспрепят-

ственно войдет и поглотится ферритом. В результате магнитная составляющая электромагнитной волны резко увеличит амплитуду электромагнитной волны внутри феррита и при этом возрастет ее энергия.

1.6 Анализ математических уравнений, описывающих акустические поля

Магнитострикция представляет собой деформирование тел при изменении их магнитного состояния. Данное явление свойственно ферромагнитным металлам и сплавам (ферромагнетикам) и ферритам.

При наложении внешнего магнитного поля происходит ориентация намагниченностей доменов по направлению вектора внешнего поля за счет смещения границ доменов. Мерой намагничивания является намагниченность \vec{J} – вектор, равный векторной сумме всех магнитных моментов M_{mag} , заключенных в единичном объеме вещества V , следовательно [2],

$$\vec{J} = \frac{1}{V} \sum M_{mag}. \quad (1.31)$$

Способность вещества к намагничиванию характеризуется магнитной восприимчивостью $k_m = \frac{J}{H}$, которая представляет собой отношение намагниченности J к напряженности внешнего магнитного поля H . Напряженность магнитного поля характеризуется силой, заключенной в единичной магнитной массе и действующей на северный магнитный полюс, т. е. $H = F_{мп}/m_{ед}$. Другой характеристикой магнитного поля является индукция магнитного поля $B = \mu_a H$, т. е. значение индукции зависит от свойств среды. Магнитная проницаемость и магнитная восприимчивость связаны соотношением $\mu = 1 + k_m$. Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость ферромагнетиков много больше единицы и зависят от напряженности поля.

В магнитострикционных преобразователях используют магнитополяризованный материал, который имеет постоянную составляющую индукции B_0 , со-

здаваемую постоянным магнитом, остаточной намагниченностью или за счет постоянного тока в обмотке подмагничивания. При наличии в образце переменной составляющей индукции, которая много меньше постоянной, суммарное направление поля не меняется, и происходит образование механических колебаний с частотой возбуждающего поля. Так как $B \ll B_0$, связь между переменными магнитного поля и переменными механических колебаний – деформацией и механическим напряжением [2].

Магнитострикционные явления в общем случае должны описываться тензорными соотношениями, учитывающими анизотропию магнитных и упругих свойств. Однако, применяемые в технике металлы имеют поликристаллическую структуру, что позволяет рассматривать их как изотропные тела. Это сводит тензорные соотношения к скалярным. Определение магнитострикционной константы в зависимости между механическими и магнитными величинами в дифференциальной форме [3]:

$$\begin{cases} -\left(\frac{\partial \epsilon}{\partial H}\right)_\sigma = -\left(\frac{\partial B}{\partial \sigma}\right)_H = \beta(\sigma, H) \\ \left(\frac{\partial \sigma}{\partial B}\right)_\epsilon = \left(\frac{\partial H}{\partial \epsilon}\right)_B = \gamma(\epsilon, B), \end{cases} \quad (1.32)$$

где σ – механическое напряжение.

Для реальных конструкций магнитострикционных преобразователей, в которых используется замкнутая магнитная цепь, индукция по длине преобразователя не изменяется, так как потоками рассеяния можно пренебречь. Местные уравнения преобразователя имеют вид [3]:

$$H = \frac{1}{\mu_\epsilon} B + \gamma \epsilon, \quad \sigma = \gamma B + E_B \epsilon, \quad (1.33)$$

где $\mu_\epsilon = \left(\frac{\partial B}{\partial H}\right)_\epsilon$ – магнитная проницаемость при постоянной деформации;

$E_B = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}\right)_B$ – модуль Юнга при постоянной индукции [3].

Кольцевой радиально колеблющийся преобразователь, как правило, выполняют в виде цилиндра с намотанными на него обмотками, как показано на рис. 1.29.

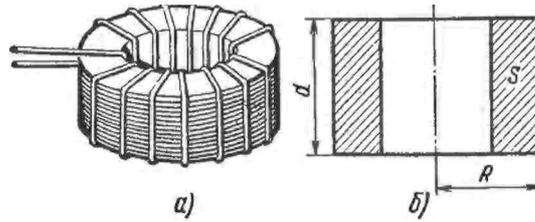


Рисунок 1.29 – Общий вид (а) и сечение магнитопровода (б) кольцевого магнито-стрикционного преобразователя [2]

По мнению Бориса Абрамовича Аграната: «Кольцевой радиально колеблющийся преобразователь, как правило, выполняется в виде цилиндра с площадью поперечного сечения, толщиной и внешним радиусом $R_{\text{нар}}$. Ток возбуждения I , вызывает однородную вдоль кольца намагниченность» [2]:

$$J = \frac{4\pi n k_m}{2\pi R_{\text{нар}}} I, \quad (1.34)$$

где n – число витков обмотки, $R_{\text{нар}}$ – внешний радиус кольцевого магнитопровода.

По окружности возникает механическое напряжение $\sigma = \tilde{a}J$, где \tilde{a} – магнито-стрикционная постоянная. Считая наружную поверхность механическим выходом, получим выражение, связывающее выходной параметр, силу \tilde{F} , и сила тока i [2]:

$$\tilde{F} = 2\pi S \tilde{a} i = \frac{4\pi n S}{R} k_m \tilde{a} i, \quad (1.35)$$

где S – площадь поперечного сечения магнитопровода.

Намагниченность можно выразить через деформацию, связанную с колебательной скоростью на механическом выходе \tilde{v} [2]:

$$J = k_m \tilde{a} \epsilon - k_m \tilde{a} \frac{\tilde{v}}{i w_{id} R_{\text{нар}}}, \quad (1.36)$$

где w_{id} – характерная частота импульса давления.

Связь между другими двумя параметрами на электрической и механической стороне [2]:

$$\tilde{U} = \frac{4\pi n S}{R_{\text{нар}}} k_m \tilde{a} \tilde{v}. \quad (1.37)$$

Выражения (1.35) и (1.37), связывающие входные и выходные характери-

стики кольцевого магнитострикционного преобразователя, учитывают его конкретную форму. Следовательно, задаваясь требуемыми энергетическими параметрами преобразователя, можно определить оптимальные размеры магнитопровода [2].

Кольцевой вибратор можно возбуждать при помощи надетой на него тороидальной обмотки. Чтобы получить эффективное излучение во внешнее пространство, нужно все кольцо с наложенной на него обмоткой заполнить соответствующей массой. Кемп [171] использует для этой цели полимеризованную смолу синварен [174]. Еще лучше снабдить кольцеобразные пластины множеством отверстий и уложить в них возбуждающую обмотку [27]. В зависимости от того, проходит ли обмотка по внутренней или наружной поверхности кольца, вибратор излучает звук во внешнее или внутреннее пространство. Неизлучающую поверхность покрывают в качестве воздушной подушки пористой резиной. При излучении звука во внутреннее пространство кольца здесь достигаются весьма большие интенсивности звука [27].

При распространении ультразвуковой волны даже сравнительно небольшой интенсивности в жидкости возникает переменное звуковое давление, амплитуда которого достигает порядка нескольких атмосфер. Под действием этого давления жидкость попеременно испытывает сжатие и растяжение. Растягивающие усилия в области разрежения волны приводит к образованию в жидкости разрывов, т.е. возникает ультразвуковая кавитация [108].

Общие уравнения колебаний твердого тела. Перемещение любой точки тела можно разложить по осям X, Y, Z на компоненты u, v, w так, что если координаты точки в исходном состоянии x, y, z , то при деформации они принимают значения $x+u, y+v, z+w$. При перемещении точки возникает деформация элемента тела. Деформация характеризуется следующими компонентами:

$$\begin{aligned} e_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x}; e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}; e_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}; \\ e_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}; e_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}; \end{aligned} \quad (1.38)$$

$$e_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}.$$

Три первых компонента представляют собой относительные удлинения линейных элементов. Они направлены параллельно осям x , y , z соответственно. Оставшиеся три компонента являются деформацией сдвига в трех координатных плоскостях, соответствующих индексам [3].

В результате возникновения деформации в каждой точке тела возникает напряженное состояние, которое также характеризуется шестью величинами: тремя составляющими напряжений сжатия-растяжения и тремя составляющими напряжений сдвига (рис.1.30).

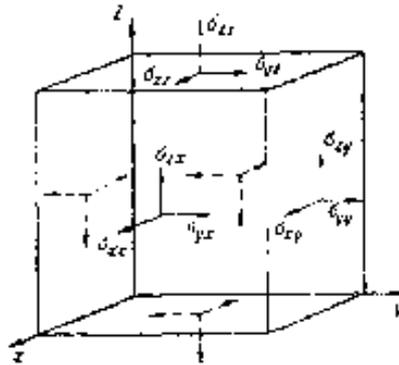


Рисунок 1.30 – Трёхмерное изображение деформации в точке тела

Экспериментально доказано, что если только напряжения не превосходят некоторого значения, то каждая из шести компонент в любой точке тела является линейной функцией. Коэффициенты, входящие в линейную зависимость напряжения от деформаций, характеризуют упругие свойства тела [3].

В изотропном теле значения коэффициентов не должны зависеть от выбора системы координат, откуда можно вывести, что независимых постоянных может быть только две. При этом:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \lambda_{\text{ламе}} \Xi + 2\mu_{\text{ламе}} \epsilon_{xx}; & \sigma_{yy} &= \lambda_{\text{ламе}} \Xi + 2\mu_{\text{ламе}} \epsilon_{yy}; \\ \sigma_{zz} &= \lambda_{\text{ламе}} \Xi + 2\mu_{\text{ламе}} \epsilon_{zz}; & \sigma_{yx} &= \mu_{\text{ламе}} \epsilon_{yx}; \\ \sigma_{zx} &= \mu_{\text{ламе}} \epsilon_{zx}; & \sigma_{xy} &= \mu_{\text{ламе}} \epsilon_{xy}, \end{aligned} \quad (1.39)$$

где $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ – напряжение сжатия (растяжения) соответственно по осям

x, y, z ; $\sigma_{yz}, \sigma_{zx}, \sigma_{xy}$ – напряжения сдвига.

В этих формулах $\Xi = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}$ определяет изменение объема единичного куба и называется объемным расширением. Две упругие постоянные $\lambda_{\text{Ламе}}, \mu_{\text{Ламе}}$ являются константами Ламе.

Четыре других упругих постоянных $E_{\text{упр}}$ – модуль продольной упругости; $\nu_{\text{Пуассона}}$ – коэффициент Пуассона; $K_{\text{сж}}, K_{\text{сд}}$ – модуль объемного сжатия и модуль сдвига. Эти константы совпадают с константой Ламе $\mu_{\text{Ламе}}$ и их можно выразить через $\lambda_{\text{Ламе}}$ и $\mu_{\text{Ламе}}$ [3].

Модуль продольной упругости $E_{\text{упр}}$ определяется как отношение напряжения к относительному удлинению, когда к цилиндрическому или призматическому образцу приложено равномерно распределенное по плоским концевым сечениям напряжение, а боковая поверхность свободна. Коэффициент Пуассона $\nu_{\text{Пуассона}}$ определяется как отношение поперечного сокращения к продольному удлинению образца при свободной боковой поверхности.

Опираясь на определения, можно получить следующие выражения:

$$E_{\text{упр}} = \frac{\mu_{\text{Ламе}}(2\lambda_{\text{Ламе}} + 2\mu_{\text{Ламе}})}{\lambda_{\text{Ламе}} + \mu_{\text{Ламе}}}, \nu_{\text{Пуассона}} = \frac{\lambda_{\text{Ламе}}}{2(\lambda_{\text{Ламе}} + \mu_{\text{Ламе}})}. \quad (1.40)$$

Модуль объемного сжатия $K_{\text{сж}}$ определяется как отношение приложенного давления к относительному изменению объема тела, подверженного равномерному гидростатическому сжатию

$$K_{\text{сж}} = \lambda_{\text{Ламе}} + \frac{2}{3}\mu_{\text{Ламе}}. \quad (1.41)$$

Модуль сдвига $\mu_{\text{Ламе}}$ определяется как отношение напряжения сдвига к деформации сдвига. Зная составляющие напряжения для каждого элемента твердого тела, можно составить уравнение движения. Для составляющей смещения по оси X уравнение имеет вид:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}, \quad (1.42)$$

где ρ – плотность тела.

Совершенно аналогичные уравнения можно получить для составляющих смещений v и w .

Подставляя в эти уравнения соотношения между напряжениями и деформациями, выводим общие уравнения колебаний твердого тела:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda_{\text{ламе}} + \mu_{\text{ламе}}) \frac{\partial \Xi}{\partial x} + \mu_{\text{ламе}} \nabla^2 u, \quad (1.43)$$

где ∇^2 – дифференциальный оператор,

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Аналогично

$$\rho \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} = (\lambda_{\text{ламе}} \mu_{\text{ламе}}) \frac{\partial \Xi}{\partial x} + \mu_{\text{ламе}} \nabla^2 \vartheta, \quad (1.44)$$

и

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda_{\text{ламе}} + \mu_{\text{ламе}}) \frac{\partial \Xi}{\partial x} + \mu_{\text{ламе}} \nabla^2 w. \quad (1.45)$$

Полученные уравнения не учитывают распределение по объему возбуждающей силы и являются уравнениями пассивной колебательной системы. Если присутствует возбуждающая сила, то она вводится в уравнения в виде члена в правой части. Его зависимость от координат должна описывать характер распределения возбуждающей силы в объеме тела. Получится уравнение активной колебательной системы – преобразователей [3].

Уравнения колебаний твердых тел конечных размеров. Вывод уравнений колебаний тел конечных размеров может быть сделан путем введения указанных соотношений между составляющими смещений и напряжений непосредственно в выведенные выше общие уравнения динамической теории упругости. В частности, если принять не равными нулю только продольные смещения, система уравнений преобразуется в простое дифференциальное уравнение продольных колебаний стержневой системы. Предположим, что деформация тела может полностью характеризоваться только одним фактором поворота относительно оси, тогда получим уравнение крутильных колебаний стержня. Для симметричных колебаний стержневой системы с использованием цилиндрической системы координат (r, θ, z) можно получить уравнение колебаний стержневой системы с учетом радиальных деформаций. Пренебрегая в этих уравнениях продольными

перемещениями, можно преобразовать их в уравнения радиальных колебаний стержня или диска [3].

Рассмотрим уравнения колебаний и их решения для тел конечного размера. Уравнение радиальных колебаний дисков, колец, стержней и труб имеет вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} u^2 \right). \quad (1.46)$$

Для приведенных выше уравнений колебания твердых тел просматривается общая структура: в левой части стоит вторая производная по времени какой-либо составляющей смещения, правая часть содержит комбинацию пространственных производных этой величины, умноженных на коэффициент, зависящий от упругих констант тела и от его плотности.

Решение уравнения радиальных колебаний дисков и стержней

$$U_r = [A_0(k_3 r) + BN_0(k_3 r)] \sin \omega t. \quad (1.47)$$

В формулах обозначены A_0 , B – коэффициенты, устанавливаемые из граничных условий; N_0 – число полных колебаний; r – расстояние от источника колебаний; k_3 – волновой коэффициент, соответствующий виду колебаний, равный: $k_3 = \omega \sqrt{\rho / (\lambda + 2\mu)}$; λ – длина волны.

Для всех видов колебаний решения содержат только периодические функции от координат, исключения составляют изгибные колебания. Для тел, которые производят изгибные колебания, в решениях наблюдаются аперiodические составляющие, что определяет появление краевых эффектов.

Для всех решений характерно наличие в аргументе пространственных функций коэффициентов, называемых волновыми и определяемых частотой, упругими свойствами и плотностью. Число неопределенных коэффициентов в решениях во всех случаях соответствует числу связей, вытекающих из граничных условий [40].

Обратимся теперь к электрическому контуру, образованному обмоткой акустического вибратора с помещенным в ней стержнем, и применим к этому контуру (по мнению Л.Бергмана) закон Ома [27]:

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.48)$$

где U – переменное напряжение, развиваемое источником, питающим вибратор, L – индуктивность обмотки, R – активное сопротивление обмотки, Φ – магнитный поток, обусловленный обратным воздействием колеблющегося стержня на обмотку.

Если стержень зажат и механические колебания в нем отсутствуют, то поток Φ равен нулю. Таким образом, можно считать, что поток Φ пропорционален максимальной индукции B_m , обусловленной обратным магнитострикционным эффектом.

На границе твердого и жидкого слоя различной толщины могут существовать поверхностные волны, аналогичные рэлеевским. Характеристическое уравнение для определения волнового числа k имеет вид

$$4k^2qs - (k^2 + s^2)^2 = i \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho} \cdot \frac{qk_t^4}{\sqrt{k_{\text{ж}}^2 - k^2}}, \quad (1.49)$$

где k – волновое число; ρ – плотность среды; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости; $q^2 = k^2 + k_l^2$, $s^2 = k^2 + k_t^2$; k_t – волновое число поперечных волн; k_l – волновое число продольных волн; $k_{\text{ж}}$ – волновое число жидкости.

В работе [39] можно найти утверждение, что при любом соотношении параметров твердой и жидкой сред уравнение (1.31) имеет один вещественный корень, соответствующий поверхностной волне, бегущей вдоль границы с фазовой скоростью, меньшей скорости волны в жидкости и скоростей продольных и поперечных волн в твердом теле. Указанная волна состоит из неоднородной волны в жидкости и двух неоднородных волн в твердом теле. Все три волны экспоненциально затухают при удалении (в обе стороны) от границе сред. Как показано в работе [39], эта поверхностная волна имеет совершенно другую структуру и скорость, чем рэлеевская волна. Энергия волны и движение частиц локализованы в основном в жидкости, а не в твердом теле.

Эрозийная активность единичной полости способствует разрушению твердых тел, находящихся в сфере воздействия ударной волны, сформированной в конце фазы сжатия или в начале вторичного расширения кавитационной полости [3]. Кавитационные пузырьки являются своеобразным трансформатором мощно-

сти. Коэффициент трансформации мощности K кавитационной полости, который можно принять за критерий её эрозионной активности, будет равен отношению средней удельной мощности полости в фазе сжатия к средней удельной мощности полости в фазе расширения [3]

$$K = \frac{R_{max}^3}{R_{min}^3 \Delta t_{min} f} \cdot \frac{0,4 \left(\beta + \frac{P_0}{P_A} \right) \left(1,9 - \frac{P_0}{P_A} \right)}{\Omega - \frac{P_0}{P_A}}, \quad (1.50)$$

где βP_A – среднее значение звукового давления, действующего на пузырёк в фазе захлопывания;

R_{min} – минимальный радиус пузырька;

R_{max} – максимальный уровень пузырька;

P_0 – гидростатическое давление;

P_A – акустическое давление;

Ω – коэффициент усреднения давления на рассматриваемом участке синусоиды;

Δt_{min} – продолжительность фазы захлопывания;

f – частота звукового поля.

$$\Omega = \frac{1 - \cos \omega t_{max}}{\omega \Delta t_{max}}. \quad (1.51)$$

Обозначим

$$\chi = \frac{R_{max}^3}{R_{min}^3 \Delta t_{min} f}, \quad (1.52)$$

$$\psi_{кав} = \frac{0,4 \left(\beta + \frac{P_0}{P_A} \right) \left(1,9 - \frac{P_0}{P_A} \right)}{\Omega - \frac{P_0}{P_A}}. \quad (1.53)$$

На основании анализа численного решения многочисленных вариантов уравнения движения паро-газового пузырька в звуковом поле установлено, что величина $\psi_{кав}$ сохраняется примерно постоянной, следовательно, значение коэффициента трансформации мощности полностью определяется величиной χ , которая является критерием эрозионной активности единичной полости [3].

1.7 Выводы и задачи исследования

Анализ состояния вопроса позволил выявить следующие положения. Использование гидропонного растениеводства позволяет получить высокие и устойчивые результаты. В растениеводстве защищенного грунта этот метод открывает возможности для механизации и автоматизации производственных процессов. Выращивание растений гидропонным методом особенно эффективно не только в районах крайнего Севера, но и на юге России пустынных и горных районах, в крупных тепличных хозяйствах. Получение продукции гидропонного растениеводства связано со значительными энергозатратами. Снижение затрат становится возможным при использовании геотермальных источников, что характерно для хозяйств Северо-Кавказского региона.

Анализ способов снижения солеотложения показал, что для предприятий АПК наиболее эффективно использование безреагентных способов обработки жидкости.

Проблема состоит в том, что несмотря на высокую эффективность электромагнитной обработки теплоносителей и наличия соответствующего оборудования энергетическая составляющая остаётся довольно высокой, что повышает себестоимость сельскохозяйственной продукции.

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.

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.

Поставлена **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.

Исходя из цели, сформулированы следующие **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.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ПОЛУЧЕНИЕ НЕОБХОДИМЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АКУСТО-МАГНИТНОГО АППАРАТА

2.1 Формулировка математической задачи моделирования акусто-магнитного аппарата и установление критериев подобия

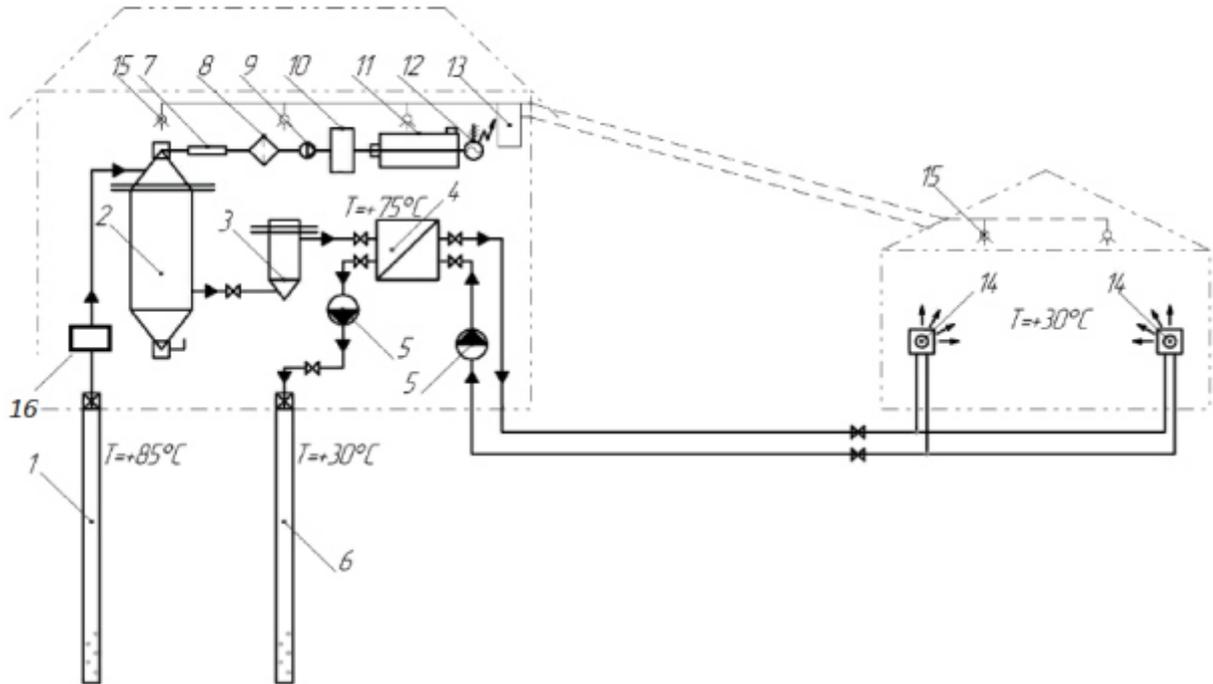
На основе поставленных в первой главе задач необходимо модернизировать технологические процессы: технологическую схему системы воздушно-конвекционного отопления тепличного комплекса с использованием геотермального источника энергии и технологические схемы подготовки питательного раствора.

Для модернизации технологического процесса системы воздушно-конвекционного отопления тепличного комплекса с использованием геотермального источника энергии предлагается изменить схему, добавив в неё аппарат для безреагентной обработки жидкости. На рисунке 2.1 представлена принципиальная схема системы воздушно-конвекционного отопления и освещения тепличного комплекса с использованием геотермального источника энергии с установленным в систему акусто-магнитным аппаратом.

Для установки акусто-магнитного аппарата необходимо выполнить ряд условий, выполнение которых позволит оптимизировать процесс образования накипи на стенках труб и теплотехнического оборудования. Основное условие заключается в том, что аппарат должен быть установлен на выходе геотермальной скважины перед системой дегазации. Количество устанавливаемых аппаратов зависит от диаметра подающей трубы и расхода воды, а также от типа акусто-магнитного аппарата. Все аппараты должны подключаться параллельно друг другу и шламоуловителям. Подающий трубопровод изготовлен из трубы большого диаметра, поэтому акусто-магнитные аппараты врезаются параллельно трубе. Для больших часовых расходов воды допускается обрабатывать до 30% потока раствора.

Перед установкой акусто-магнитного аппарата необходимо выполнить ревизию всей системы подачи геотермальной воды, произвести замену трубопрово-

дов, фильтров, очистить теплообменник от старой накипи. Акусто-магнитные аппараты и шламоотделители устанавливаются таким образом, чтобы они всегда были заполнены геотермальной водой. Фильтры и дозирующие устройства необходимо периодически промывать.



1 – производительная скважина геотермальной воды; 2 – сепаратор; 3 – фильтр тонкой очистки; 4 – теплообменник; 5 – насос; 6 – нагнетательная скважина геотермальной воды; 7 – трубчатый конденсатор; 8 – сетчатый фильтр; 9 – вакуум – компрессор; 10 – ресивер; 11 – модифицированный двигатель внутреннего сгорания; 12 – электрогенератор; 13 – электрический щит; 14 – калорифер; 15 – лампы освещения; 16 – акусто-магнитный аппарат.

Рисунок 2.1 – Принципиальная схема системы воздушно - конвекционного отопления и освещения тепличного комплекса с использованием геотермального источника энергии с установленным акусто-магнитным аппаратом

Сущность акусто-магнитного аппарата, который предполагается установить в технологическую схему подготовки геотермальной воды поясняется чертежом рис.2.2 – показан общий вид устройства с разрезом по осевой линии, на рис.2.3 – сечение А-А; на рис.2.4 – общий вид устройства; на рис.2.5 – сечение В-В; на рис.2.6 – электрическая схема соединения обмоток катушки магнитопровода.

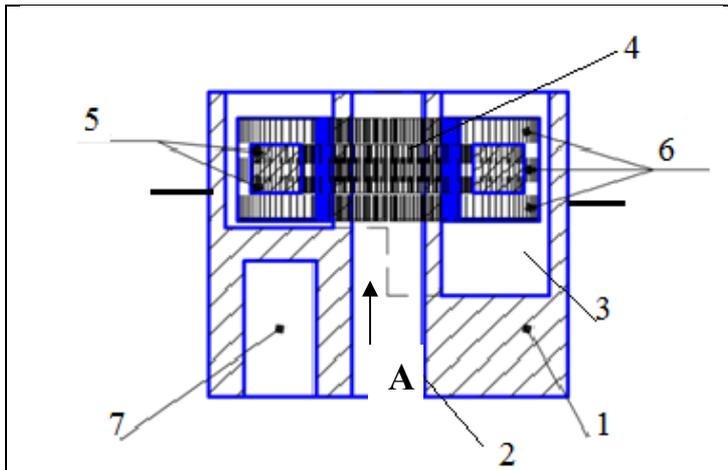


Рисунок 2.2 – Общий вид устройства с разрезом по осевой линии

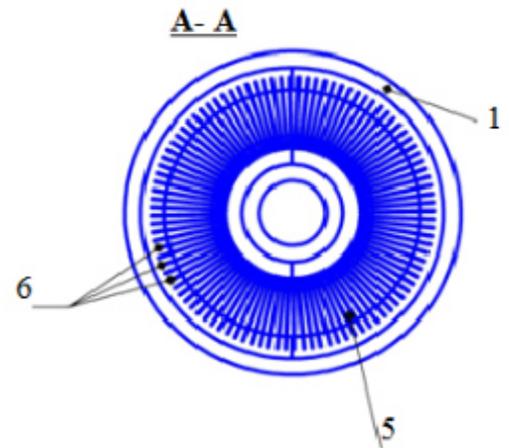


Рисунок 2.3 – Сечение А-А

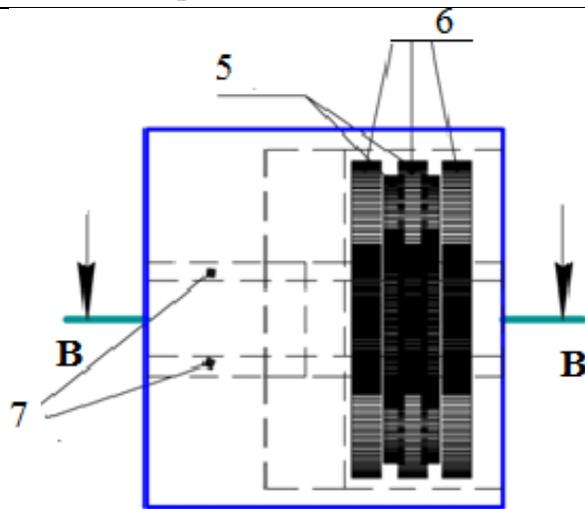


Рисунок 2.4 – Общий вид устройства

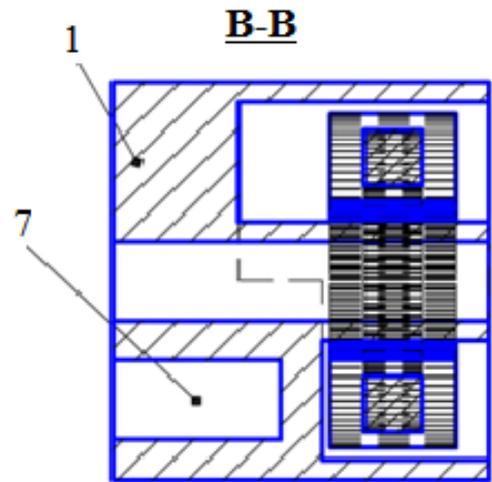


Рисунок 2.5 – Сечение В-В

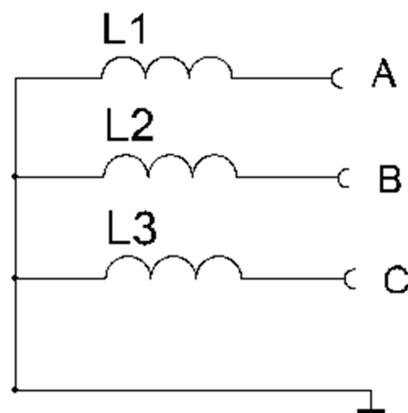
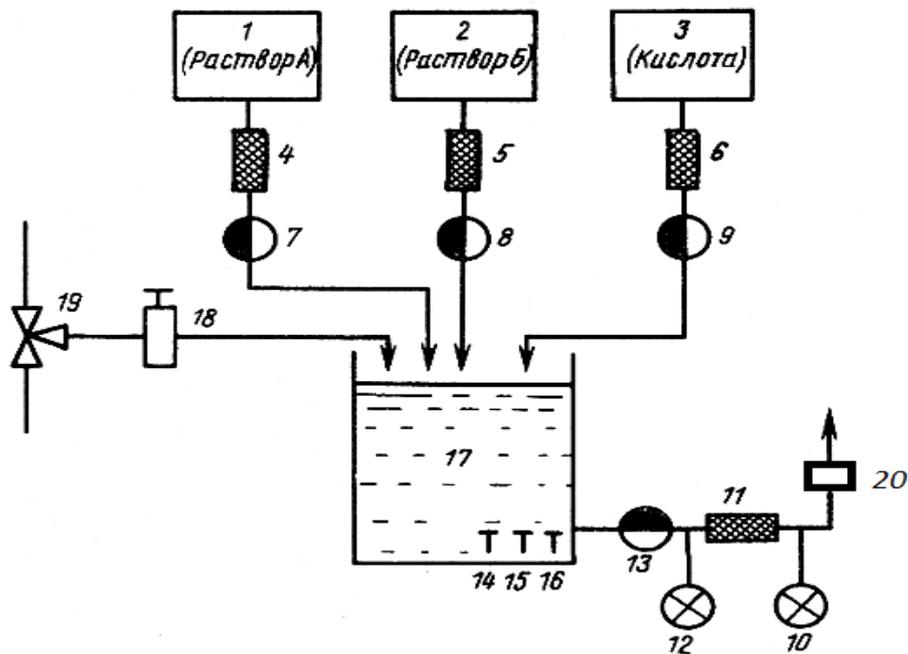


Рисунок 2.6 – Электрическая схема соединения обмоток катушки магнитопровода

Устройство для акустической и магнитной обработки жидкости, имеет цилиндрический корпус 1 из диамагнитного материала с осевым сквозным отвер-

стием 2. Корпус 1 имеет проточку 3 для электромагнитной системы 4. Она состоит из ферритового магнитопровода 5 с расположенной на нем катушкой, состоящей из не менее, чем трех электрических обмоток 6 с выводами, подключенными по схеме «звезда» к источнику питания. В качестве источника напряжения использован источник трехфазного переменного напряжения, создающий переменное напряжение в резонансном ультразвуковом диапазоне частот $32\div 35$ кГц (Приложение А). Корпус 1 также имеет разъем 7 для подключения выводов обмотки 6 к источнику трехфазного переменного напряжения и заполнен компаундом, например, эпоксидной смолой. Подбор размеров ферритового магнитопровода, числа витков и диаметра провода обмотки осуществляют в зависимости от количества обрабатываемой за единицу времени жидкости.

Для модернизации технологического процесса предлагается изменить схему растворного узла, добавив в неё аппарат для безреагентной обработки жидкости и шламоотделитель. Принципиальная схема доработанного растворного узла представлена на рис.2.7.



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

Рисунок 2.7 – Блок-схема растворного узла

Технологические схемы подготовки питательного раствора различны, однако, есть ряд условий, выполнение которых позволит минимизировать отложение солей на стенках трубопроводов и фильтров. Основным условием является установка противонакипных устройств. Их количество зависит от часового расхода воды, подлежащей обработке, а также от типа установленного аппарата. Все аппараты должны подключаться параллельно друг другу и шламоуловителям. Аппараты безреагентной обработки жидкости следует подключать после рабочего насоса, установленного на выходе из бака с маточным раствором. Очередность установки аппаратов и фильтров не имеет значения, однако, предпочтительнее, чтобы аппараты устанавливались до фильтров. В зависимости от диаметра трубопровода аппараты устанавливаются в разрыв трубопровода, если диаметр не более 20 см, и врезаются параллельно трубе при больших диаметрах труб. Для больших часовых расходов воды допускается обрабатывать до 30% потока раствора.

При изменении давления в системе (в частности, при выходе раствора из инъекционных смесителей) создаются условия для перехода раствора в перенасыщенное состояние, при котором начинается кристаллизация и осаждение известковых отложений и накипи в форсунках. Это приводит к нарушению режима работы и в последствие к остановке работы форсунки. Форсунки периодически приходится очищать от накипи, механически и/или химически.

Предлагается решение по защите форсунок: посредством применения акусто-магнитного аппарата обеспечить стабильную работу форсунок в период между техобслуживанием, увеличив интервал между очистками форсунок.

Корректировку расхода питательного раствора через аппарат безреагентной обработки жидкости (акусто-магнитный аппарат) производим посредством вентилей и контролируем расход питательного раствора на выходе и входе посредством датчиков расхода жидкости. Для предотвращения работы акусто-магнитного аппарата без тока раствора устанавливается блокировка включения питания без включения подающего насоса. Интенсивность акусто-магнитной обработки раствора не меняется за весь период развития растений. Аппарат работает каждый

раз, когда включается подающий раствор насос.

Перед установкой акусто-магнитного аппарата необходимо выполнить ревизию всей системы подачи маточного раствора, произвести промывку трубопроводов, фильтров, дозирующих устройств. Акусто-магнитные аппараты и шламоотделители устанавливаются, таким образом, чтобы они всегда были заполнены гидропонным раствором. Фильтры и дозирующие устройства необходимо периодически промывать.

На чертеже (рисунки 2.8, 2.9) представлен акусто-магнитный аппарат, который предполагается установить в технологическую схему подготовки гидропонного раствора. Устройство состоит из двух цилиндрических корпусов (8) с проточками, расположенных на трубопроводе (4), металлических гаек (2) с резьбой, фиксирующих цилиндрические корпуса на трубопроводе и крепящихся к трубопроводу винтами (11), прижимных диэлектрических шайб (1) и (3), размещенных внутри корпусов четырех ферритовых преобразователей (5), с трехфазными обмотками (6), имеющими выводы (7).

Сформулируем задачу моделирования акусто-магнитного аппарата. Моделирование является процессом создания или отыскания в природе некоторого объекта, замещающего исследуемый объект. Этот промежуточный объект может быть реальным или мысленным объектом (математической моделью). Промежуточный объект даёт надежные сведения об изучаемом объекте, если подобен изучаемому объекту, т.е. параметры модели 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.

Установление и создание подобных явлений основано на третьей теореме подобия, сформулированной следующим образом: необходимые и достаточные условия подобия подобны по параметрам, входящим в условия единственности, и равенству определяющих критериев подобия. К условиям однозначности относятся факторы и условия, не зависящие от механизма самого явления.

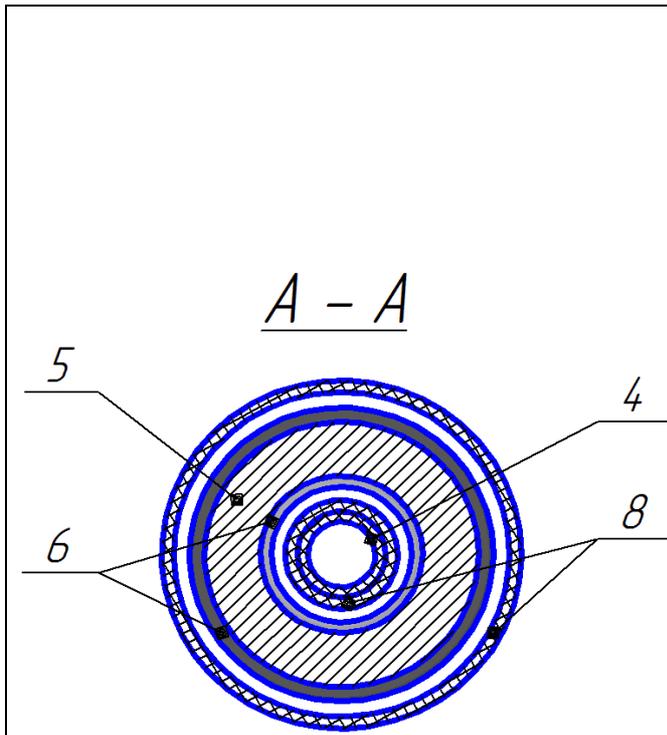


Рисунок 2.8 – Поперечный разрез акусто-магнитного аппарата

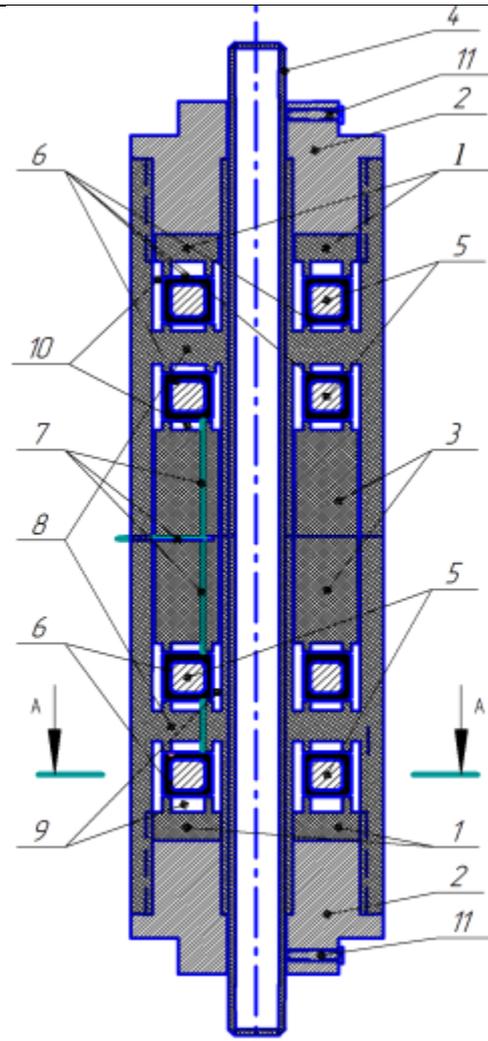


Рисунок 2.9 – Продольный разрез акусто-магнитного аппарата

Анализ характеристик и эффективности применения устройств, а также рассмотрение многочисленных конструкций устройств, позволяет установить следующие условия однозначности:

- Рабочий зазор аппарата должен находиться в пределах, позволяющих не снижать производительность аппарата;
- учитывать фактор вращающихся полей для повышения эффективности обработки жидкости;
- применение прямого аппарата для улучшения его гидродинамических характеристик;
- учёт фактора многократного воздействия на воду;

- учёт стоимости дорогостоящих магнитных сплавов и медного обмоточного провода.

Физические параметры среды и тел, образующих систему:

- время пребывания обрабатываемой жидкости в акустических и магнитных полях;
- напряженность магнитного поля в рабочем зазоре;
- градиент напряженности в зазоре аппарата;
- скорость потока воды;
- количество пересечений магнитного поля;
- концентрация солей.

Поскольку в настоящее время нет научно обоснованных параметров магнитного поля при очистке воды, необходимо использовать полученные ранее данные.

Начальные состояния системы. Перед вводом в эксплуатацию должна осуществляться предварительная настройка аппарата. Генератор настраивается на рабочую частоту аппарата. В ходе эксплуатации должен осуществляться ежесуточный контроль за температурой микросборки системы автоматике и аппарата и сравнение с результатами моделирования процессов, происходящих при данных технологических операциях. Расход воды, как и ее состав, должны быть оптимизированы. Рабочий зазор должен быть заполнен водой с тем, чтобы исключить образование в нем воздушных пробок и застойных зон. Аппарат нужно своевременно очищать.

Условия на границах системы. Применение материалов конструкции аппарата, обеспечивающих оптимальный тепловой режим аппарата без перегрева.

Взаимодействие объекта и внешней среды. Предварительная фильтрация обрабатываемой жидкости с целью предотвращения забивания отверстий твердыми включениями, находящимися в обрабатываемой жидкости.

При соблюдении перечисленных выше условий протекания технологического процесса и факторов предлагается новый способ водоподготовки, позволяющий избавиться от отложения солей на теплотехническом оборудовании и удалить ранее образовавшиеся соляные отложения.

Возможность получения подобия согласно третьей теореме реализуется, ко-

гда задание условий однозначности выделяет из бесконечного множества процессов, которым соответствует дифференциальное уравнение, те конкретные процессы, подобие которых необходимо обеспечить.

При моделировании иногда бывает затруднительно применить π -теорему для установления количества критериев, обеспечивающих подобие. В этих случаях необходимо стремиться к постановке задачи на основе третьей теоремы подобия, устанавливая условия однозначности и критерии подобия путем логического анализа и контрольных экспериментов.

При изучении всех этих проблем методом моделирования не обязательно предъявлять к первоначальному математическому описанию требования доказанности существования и единственности решения. Известно, что во многих случаях, когда условия существования и единственности математических решений не доказаны, физические решения существуют. Поэтому моделирование вполне удовлетворяется опытной проверкой.

Вопрос о математической корректности поставленной задачи в исследованиях, проводимых методом моделирования, может быть сведён только к установлению начальных и граничных условий с концентрацией внимания на опытной проверке [31]. В дальнейшем, при обработке результатов исследований и создании или уточнении соответствующих аналитических методов исследователь, выступая в роли математика, может заняться проблемами корректности, существования, единственности, переходя из области эксперимента в область теории [31].

Для создания нелинейного подобия одного явления другому следует, прежде всего, попытаться представить его буквенно теми же уравнениями, изменением масштабов выявить равенство критериев подобия и этим показать наличие строгого подобия. Нелинейные параметры при этом должны быть представлены сначала как постоянные, а далее в форме относительных характеристик, которые в случае подобия должны быть тождественными. При отсутствии подобия необходимо изменять параметры, добиваясь равенства критериев подобия и тождественности нелинейных характеристик. При уравнениях разного класса или при уравнениях, содержащих сложные зависимости, следует применять нелинейно подоб-

ные преобразования. Однако, метод тождественности относительных характеристик нелинейных элементов и в этом случае действует в полной мере.

Анализ измеренных величин связанных с установлением типа функциональной зависимости между переменными, характеризующими данное явление. Вид этих функциональных зависимостей устанавливается путём обобщения экспериментальных данных. Таким образом, необходимо ответить на важные вопросы, возникающие при планировании и обработке данных эксперимента:

- какие величины необходимо измерять;
- как обрабатываются результаты измерений;
- пределы использования эмпирической зависимости.

Согласно третьей теореме подобия необходимым и достаточным условием для создания подобия является соответствие сходных параметров, входящих в условия однозначности, и равенство определяющих критериев подобия. К условиям однозначности относятся факторы и условия, не зависящие от механизма самого явления:

- физические параметры среды и тел;
- геометрическое свойство;
- начальное состояние системы;
- условия на границах системы и кавитирующей жидкости;
- взаимодействие объекта и внешней среды.

Для того, чтобы разработать математическую модель нужно установить критерии подобия. Для их установления нужно установить соотношение между экспериментальными и теоретическими изысканиями. Для этого выполняются следующие действия.

1. Сначала проводятся первичные опыты и описывается физическая модель. Эксперименты устанавливают эмпирические связи между известными величинами и накопленными сведениями о процессе.
2. При переходе от физической модели к математической определяются основные расчетные коэффициенты и составляется перечень размерных пара-

метров. Количественный анализ проводится по двум направлениям. Одно из них – это поиск известных уравнений, определяющих процесс, другое – поиск соотношений, характеризующих процесс в общих чертах.

3. С помощью первого направления формулируется математическая модель изучаемого явления. Но так как она описывает множество одинаковых по физической природе процессов, необходимо сформулировать условия единственности решения. Это начальные и граничные условия, сформулированные на основе уже известного перечня независимых параметров процесса. Если возможно аналитическое решение основных уравнений, тогда опыты имеют такую цель как апробация полученного решения и уточнение расчетных коэффициентов.
4. Рассматривая отдельные величины не получим представления о роли, которую они играют в развитии процесса. Так как существенны не отдельные величины, а комбинации величин, то первоначальные величины надо вводить не как разрозненное множество индивидуальных параметров, а в виде комплексов. Полученный комплекс даст новую комплексную переменную, по которой можно определять изменения, происходящие в исследуемом процессе.
5. Осуществляется переход к безразмерным комплексам посредством метода масштабных преобразований. В этом случае уравнения и условия приводятся к безразмерному виду. В уравнения входят безразмерные комплексы, используемые при анализе исследуемой системы, и они могут быть критериями подобия подобных процессов [59].

Применение рассмотренных случаев для рассмотрения методов теории подобия применительно к акусто-магнитным аппаратам позволяет создать метод подобия акусто-магнитных аппаратов. Предлагаемый метод базируется на соблюдении условий подобия:

- подобие электромагнитных полей в однородной изотропной среде;
- подобие электромагнитных полей в неоднородной и анизотропной среде;
- подобие движущихся электромагнитных полей (электродинамическое подо-

бие);

- подобие тепловых процессов в акусто-магнитном аппарате;
- подобие неустановившегося движения несжимаемой жидкости, проходящей через акусто-магнитный аппарат;
- подобие геометрических размеров акусто-магнитных аппаратов.

При выводе критериев для сравнительной оценки акусто-магнитных аппаратов необходимо рассматривать все выше перечисленные условия подобия. При соблюдении всех условий подобия можно установить подобие режимов работы акусто-магнитных аппаратов при приближённом равенстве их КПД [68]. Кикучи определял электромеханический коэффициент полезного действия магнитострикционного вибратора на резонансной частоте как отношение подводимой электрической мощности к мощности, преобразованной в механическую [68].

Существующие методы физического подобия не всегда обеспечивают желательную точность, а также не охватывают все возможные конфигурации аппаратов по безреагентной обработке жидкости, поэтому важное значение имеет правильная постановка опытных исследований и обобщение результатов этих исследований. Весьма существенно производить сравнительную оценку различных конструкций акусто-магнитных аппаратов в наиболее наглядной и компактной форме. При этом необходимо отбрасывать те факторы, которые характеризуют лишь частные особенности данного опыта, а не основные качества конструкции.

На основе второй и третьей теорем подобия устанавливается количество и состав критериев, необходимых для исчерпывающего описания процессов, происходящих в акусто-магнитном аппарате. Структура критериев подобия неразрывно связана с внутренними закономерностями рассматриваемых процессов, происходящих в акусто-магнитном аппарате. Состав критериев должен четко указывать, какие величины следует измерять в ходе экспериментов, чтобы их результаты были сопоставимы. Экспериментальные данные в критериальном виде используются для планирования экспериментов. Шаг варьирования факторов должен соответствовать шагу варьирования критериев подобия. При этом можно использовать два подхода: 1) многократно промоделировать случайным образом

факторы процесса в заданных пределах варьирования и для каждой случайной реализации вычислить значения критериев подобия, затем определить шаг варьирования критериев подобия; 2) задать шаг варьирования факторов процесса и на основе этого определить значение шага варьирования критериев подобия.

Далее, согласно методам планирования эксперимента, происходит выбор необходимого плана эксперимента и составляется матрица планирования эксперимента для одной из серий опытов. Эта матрица отличается от обычной тем, что в ней указаны не только значения критериев подобия, но и значения параметров, соответствующих данным численным значениям критериев подобия. При этом шаг отклонения критериев подобия задаётся с помощью вариации параметров, входящих в них.

В соответствии с матрицей планирования эксперимента проводятся все эксперименты и определяется уравнение критериальной регрессии. Коэффициенты уравнения регрессии оцениваются в соответствии с процедурой, предложенной в работе Аллена [165].

Построенная модель проверяется на точность и адекватность. Если описание плана системы первого порядка не позволяет построить адекватную и точную модель системы, то приступают к построению планов второго порядка.

Однако, создание полностью аналогичных акусто-магнитных устройств, которые сильно отличаются по размерам, имеет мало смысла, а зачастую и неосуществимо. Это связано с тем, что акустическая мощность преобразователя, температура обмотки аппарата, плотность тока в обмотке и магнитная индукция в размерах акусто-магнитного устройства не изменяются пропорционально. Если такая конструкция акусто-магнитного устройства рациональна, то аналогичное ему, но других размеров, может быть не работоспособным. Поэтому, основной задачей данного метода является получение подходящих критериев подобия.

Данный метод позволяет по известной характеристике одного акусто-магнитного аппарата получить характеристики другого. Проанализируем все перечисленные выше условия подобия.

Анализ подобия электромагнитных полей в акусто-магнитном аппарате.

Протекание электромагнитных процессов во времени и в пространстве описывается в общем случае системой уравнений Максвелла. Эти уравнения для однородной, изотропной среды имеют вид:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{\sigma}; \operatorname{rot} \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t; \operatorname{div} \vec{B} = 0; \operatorname{div} \vec{D} = \rho_3; \\ \vec{\sigma} = \gamma \vec{E} + \partial \vec{D} / \partial t + \rho_3 \vec{v}; \vec{D} = \varepsilon \vec{E}; \vec{B} = \mu \vec{H}, \end{cases} \quad (2.1)$$

где \vec{B} – вектор магнитной индукции; \vec{D} – электрическое смещение; ρ_3 – объемная плотность заряда; $\vec{\sigma}$ – вектор плотности тока; \vec{v} – вектор скорости движения зарядов; ε – диэлектрическая проницаемость среды.

Плотность тока $\vec{\sigma}$ в системе (2.1) для общности выражена в виде суммы трех составляющих: $\gamma \vec{E}$, $\partial \vec{D} / \partial t$, $\rho_3 \vec{v}$ – плотности токов проводимости, смещения, переноса (конвекции).

При этом надо иметь в виду, что первая и третья составляющие могут иногда решающим образом проявляться одновременно в одной и той же точке пространства (например, лента транспортера генератора Ван-де-Граафа), но все же часто одной из них можно пренебречь. Две первые составляющие обычно одновременно проявляются в полупроводящей среде. В хорошо проводящих средах можно пренебречь второй составляющей по сравнению с первой, а при исследовании диэлектрических веществ пренебрежение первой составляющей не ведет к заметным погрешностям.

Система уравнений (2.1) вместе с заданными условиями однозначности является полной системой, т.е. позволяет однозначно определить состояние электромагнитного поля в каждой точке пространства и в каждый момент времени, характеризующее зависимостями

$$H = f(x, y, z, t) \text{ и } E = \varphi(x, y, z, t). \quad (2.2)$$

Условия однозначности включают в себя геометрические параметры исследуемой системы, физические параметры среды (ε , μ , γ , ρ), начальные условия ($\vec{E} = \vec{E}_0$ и $\vec{H} = \vec{H}_0$) при $t = 0$ во всех точках системы, а также краевые условия на ее границах.

Геометрическое подобие характеризуется равенством масштабов геометри-

ческих параметров по трем осям координат:

$$m_x = m_y = m_z = m_l. \quad (2.3)$$

Если это равенство для двух исследуемых систем будет сохранено, то электромагнитные поля этих систем будут геометрически подобны. Масштаб m_l при установлении подобия двух систем удобно вычислять как отношение двух одинаковых характерных геометрических размеров. За характеристику обычно принимают размеры, отражающие конфигурацию системы. После выбора характерных размеров для двух систем нужно определить масштаб

$$m_l = \frac{l_1}{l_2}, \quad (2.4)$$

где l_1 и l_2 – характерный и сходственный размеры систем 1 и 2.

Критерии подобия электромагнитного поля в однородной изотропной среде могут быть получены способом интегральных аналогов непосредственно из уравнений системы (2.1). Однако, удобнее получить их, предварительно подставив выражения $\vec{\sigma}$, \vec{D} , и \vec{B} в первые четыре уравнения, для того, чтобы эти уравнения содержали лишь два параметра процесса, а именно \vec{H} и \vec{E} , поскольку изменений \vec{H} и \vec{E} во времени и пространстве полностью характеризуют состояние электромагнитного поля. После такой подстановки получим:

$$\text{rot}\vec{H} = \gamma\vec{E} + \varepsilon(\partial\vec{E}/\partial t) + \rho\vec{v}; \quad (2.5)$$

$$\text{rot}\vec{E} = -\mu\partial\vec{H}/\partial t; \quad (2.6)$$

$$\text{div}\vec{H} = 0; \quad (2.7)$$

$$\text{div}\vec{E} = \rho/\varepsilon. \quad (2.8)$$

Соотношения (2.5) и (2.6) являются основными уравнениями электромагнитного поля, а уравнения (2.7) и (2.8), не содержащие переменного параметра t , вспомогательными, характеризующими состояние системы. При решении основных уравнений соотношение (2.7) играет роль начальных условий интегрирования, а уравнение (2.8) служит для определения величины ρ . Для получения критериев подобия электромагнитного поля достаточно решения только основных уравнений.

Применяя способ интегральных аналогов, из первого уравнения получим три критерия подобия ($K_{y1} = 3$) в четырех формах записи ($F_{y1} = 4$), а из второго – один критерий ($K_{y2} = 1$) в двух формах записи ($F_{y2} = 2$). Интегральными аналогами $\text{rot } \vec{H}$ и $\text{rot } \vec{E}$ являются собственно выражения $\frac{H}{l}$ и $\frac{E}{l}$, где l – характерный геометрический размер.

При форме записи, соответствующей делению уравнения (2.5) и (2.6) на их левые части, получаем следующие критерии подобия:

$$\pi_{1эм} = \frac{\gamma El}{H}; \quad \pi_{2эм} = \frac{\varepsilon El}{Ht}; \quad \pi_{3эм} = \frac{\rho vl}{H}; \quad \pi'_{1эм} = \frac{\mu Hl}{Et}. \quad (2.9)$$

Аналогичные критерии подобия можно получить и из рассмотренного уравнения Максвелла, записанного в интегральной форме.

Критерии (2.9) при условии соблюдения геометрического подобия можно свести к двум. Так,

$$\pi_{3эм} = \pi_{2эм}. \quad (2.10)$$

Это легко доказать, если подставить вместо v и ρ их аналоги $v \equiv l/t$ и $\rho \equiv \varepsilon E/l$.

Определив из $\pi_{2эм}$ значение E/H и подставив его в $\pi_{1эм}$ и $\pi'_{1эм}$, получим:

$$\pi_{1эм} = \frac{\varepsilon}{\gamma t} \cdot \frac{1}{\pi_{2эм}}, \quad \pi'_{1эм} = \mu \varepsilon \frac{l^2}{t^2} \cdot \frac{1}{\pi_{2эм}}. \quad (2.11)$$

Учитывая, что в (2.11) множитель $1/\pi_{2эм}$ определяет только масштаб процесса и может быть опущен, окончательно запишем:

$$\pi_{1эм} = \frac{\varepsilon}{\gamma t}; \quad \pi'_{11эм} = \mu \varepsilon \frac{l^2}{t^2} = \pi_{1эм} \frac{\mu \gamma l^2}{t}; \quad \pi_{11эм} = \frac{\mu \gamma l^2}{t}. \quad (2.12)$$

Если для нахождения критериев использовать также и уравнение (2.8), то можно получить еще один критерий:

$$\frac{\rho l}{E \varepsilon} = idem. \quad (2.13)$$

Легко проверить, что данный критерий может быть получен непосредственно из основного уравнения (2.5) если принять

$$v = \partial l / \partial t. \quad (2.14)$$

Действительно, при делении четвертого члена этого уравнения на третий

получим

$$\pi_{3ЭМ} = (\rho l/t)(t/\varepsilon E) = \rho l/(\varepsilon E). \quad (2.15)$$

Это лишний раз подтверждает то, что уравнение (2.8) является лишним при нахождении критериев подобия электромагнитного поля методом интегральных аналогов.

Анализируя совокупность параметров $H, E, \gamma, \varepsilon, \mu, \rho, v, l, t$ при определении критериев подобия на базе π -теоремы легко видеть, что из этих девяти параметров ($m = 9$) четыре являются независимыми ($k = 4$). При этом $k_\pi = 5$.

В практике исследований из возможных форм записи необходимо выбрать такую, которая наилучшим образом может отразить свойства данной среды. Так, для электромагнитного поля в диэлектриках, вакууме и воздухе (при $\gamma=0$, при $\rho=0$, при $v=0$) целесообразно выбрать форму записи, соответствующую системе независимых параметров H, ε, l, t :

$$\begin{cases} \pi_{1ЭМ} = \frac{E}{H\varepsilon^{-1}l^{-1}t}; & \pi_{2ЭМ} = \frac{\mu}{\varepsilon^{-1}l^{-2}t^2}; & \pi_{3ЭМ} = \frac{\gamma}{\varepsilon t^{-1}}; \\ \pi_{4ЭМ} = \frac{\rho}{Hl^{-2}t}; & \pi_{5ЭМ} = \frac{v}{lt^{-1}}. \end{cases} \quad (2.16)$$

Из этих пяти критериев три ($\pi_{3ЭМ}, \pi_{4ЭМ}$ и $\pi_{5ЭМ}$) должны быть отброшены, поскольку γ, ρ и l равны нулю, Кроме того, $m = 6, k = 4$ и, следовательно, $k_\pi = 2$. Из оставшихся двух критериев один является определяющим (например, $\pi_{2ЭМ}$), чему соответствует критериальное уравнение

$$\pi_{1ЭМ} = f_1(\pi_{2ЭМ}) \text{ или } \frac{E\varepsilon l}{Ht} = f_1\left(\frac{\mu\varepsilon l^2}{t^2}\right). \quad (2.17)$$

При наличии же в указанных средах зарядов ($\gamma=0$, но $\rho \neq 0, v \neq 0$) имеем

$$\pi_{1ЭМ} = f_1(\pi_{2ЭМ}, \pi_{4ЭМ}, \pi_{5ЭМ}) \text{ или } \frac{E\varepsilon l}{Ht} = f_2\left(\frac{\mu\varepsilon l^2}{t^2}, \frac{\rho l^2}{Ht}, \frac{vt}{l}\right). \quad (2.18)$$

Подобия поля в полупроводящей среде (при $\rho=0, v=0$) можно устанавливать, пользуясь формой записи (2.16). Учитывая, что критерии $\pi_{4ЭМ}$ и $\pi_{5ЭМ}$ должны быть отброшены, получим критериальное уравнение

$$\pi_{1ЭМ} = f_3(\pi_{2ЭМ}, \pi_{3ЭМ}) \text{ или } \frac{E\gamma l}{H} = f_3\left(\frac{\mu\gamma l^2}{t}, \frac{\varepsilon}{\gamma t}\right). \quad (2.19)$$

Рассматривая проводящую среду (при $\varepsilon=0, \rho=0, v=0$), необходимо в форме записи (2.16) исключить еще и критерий $\pi_{3ЭМ}$. При этом

$$\frac{E\gamma l}{H} = f_4\left(\frac{\mu\gamma l^2}{t}\right) \quad (2.20)$$

или

$$\pi_{1ЭМ} = f_4(\pi_{2ЭМ}). \quad (2.21)$$

Полученные критерии подобия могут применяться в виде соотношений между масштабами. На основе (2.20) можно записать их в следующем виде:

$$m_\mu m_\gamma m_l^2 m_t^{-1} = 1; m_\mu m_\varepsilon m_l^2 m_t^{-2} = 1. \quad (2.22)$$

На основе (2.16) запишем:

$$\begin{cases} m_E = m_H m_\gamma^{-1} m_l^{-1}; m_\mu = m_\gamma^{-1} m_l^{-1} m_t; \\ m_\varepsilon = m_\gamma m_t; m_\rho = m_H m_l^{-2} m_t; m_\nu = m_l m_t^{-1}. \end{cases} \quad (2.23)$$

При использовании такого рода соотношений нужно иметь в виду все те замечания, которые были сделаны ранее по поводу формы записи критериев подобия для конкретных случаев.

Критерии подобия электромагнитных полей, создаваемых периодическими переменными токами частотой $\omega=2\pi f$, остаются теми же (см. (2.16) и (2.20)), но их следует дополнить критерием гомохронности $\pi_{6ЭМ}=\omega t$. При этом критерии подобия имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \pi_{1ЭМ} = \frac{E}{H\gamma^{-1}l^{-1}}; \pi_{2ЭМ} = \frac{\mu}{\gamma^{-1}l^{-2}\omega^{-1}}; \pi_{3ЭМ} = \frac{\varepsilon}{\gamma\omega^{-1}}; \\ \pi_{4ЭМ} = \frac{\rho}{Hl^{-2}\omega^{-1}}; \pi_{5ЭМ} = \frac{\nu}{l\omega}; \pi_{6ЭМ} = \frac{t}{\omega^{-1}}. \end{cases} \quad (2.24)$$

Критерии подобия, отвечающие (2.19), имеют вид

$$\begin{aligned} \pi_{1ЭМ} &= \frac{\varepsilon}{\gamma} \omega; \\ \pi_{11ЭМ} &= \mu\gamma l^2 \omega; \\ \pi'_{11ЭМ} &= \mu\varepsilon l^2 \omega^2. \end{aligned} \quad (2.25)$$

В однородных изотропных средах, электромагнитные поля подобны, если существует геометрическое подобие систем и определяющие критерии подобия равны в одинаковых точках пространства и в одинаковые моменты времени.

Подобия полей в неоднородной и анизотропной среде. Условия подобия в случае неоднородных и анизотропных сред должны устанавливаться в соответствии с третьим и четвертыми дополнительными положениями.

Подобия электромагнитных процессов и анизотропных средах устанавливается с учетом того, что их физические свойства характеризуются тензорами ε_{ik} или μ_{ik} вместо скалярных величин ε или μ , характеризующих изотропную среду. Выбирая оси координат, совпадающими с главными направлениями осей тензоров, можно вдоль каждой оси установить свой геометрический масштаб m_{l_x} , m_{l_y} , m_{l_z} и свой масштаб при измерении физических параметров ε или μ . Пусть эти различные масштабы приняты для μ равными m_{μ_x} , m_{μ_y} , m_{μ_z} . Геометрические размеры сравниваемых систем находятся в прямом соотношении:

$$x_1 = m_{l_x} x_2; y_1 = m_{l_y} y_2; z_1 = m_{l_z} z_2. \quad (2.26)$$

Если $m_{l_x} \neq m_{l_y} \neq m_{l_z}$, то геометрическое подобие отсутствует. Из критерия подобия

$$\pi = \mu \gamma l^2 / t, \quad (2.27)$$

который в данном случае должен остаться справедливым, с учетом изменения масштабов вдоль любой оси следует, что

$$m_{l_x}^2 m_{\mu_x} = m_{l_y}^2 m_{\mu_y} = m_{l_z}^2 m_{\mu_z}. \quad (2.28)$$

Следовательно, для получения подобия величины μ_{ik} вдоль осей x , y , z должны быть обратно пропорциональны квадрату геометрических размеров вдоль соответствующих осей.

Рассмотрим подобие электромагнитных явлений в случае анизотропной среды, свойства которой в различных точках пространства различны. Физические параметры D , E , H и B подобны только вдоль осей x , y , z . Полагая, что физические параметры рассматриваемой системы линейны, можно выразить D через E . Аналогичные соотношения могут быть записаны и для составляющих D и E по осям. Так, например,

$$D_x = \varepsilon_{11} E_x + \varepsilon_{12} E_y + \varepsilon_{13} E_z; \quad (2.29)$$

$$D_y = \varepsilon_{21} E_x + \varepsilon_{22} E_y + \varepsilon_{23} E_z; \quad (2.30)$$

$$D_z = \varepsilon_{31} E_x + \varepsilon_{32} E_y + \varepsilon_{33} E_z. \quad (2.31)$$

Коэффициенты ε_{ik} в этом преобразовании являются составляющими сим-

метричного тензора.

В случае прямолинейной анизотропии, когда оси анизотропии совпадают с выбранной для анализа прямоугольной системой координат, выражение для диэлектрической проницаемости может быть представлено тензором второго ранга

$$\varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{vmatrix}. \quad (2.32)$$

Уравнение поля в этом случае можно записать следующим образом:

$$\bar{\varepsilon} \nabla \varphi = 0 \quad (2.33)$$

или

$$\operatorname{div} \bar{D} = \operatorname{div} \bar{\varepsilon} \operatorname{grad} \varphi = 0, \quad (2.34)$$

где φ – потенциал точки созданного в данной среде электрического поля.

Покажем, что среда (или установка – некоторое сооружение, содержащее комплексную среду) с анизотропными свойствами, характеризуемыми значениями ε_{y1} , ε_{z1} , может быть подобна другой среде, имеющей другие анизотропные свойства и другие геометрические размеры, не отвечающие условиям геометрического подобия. Пусть для этой новой среды физические параметры вдоль главных осей ε_{y1} , ε_{y2} , ε_{y3} . В этом случае должно иметься указанное выше соотношение между геометрическими координатами: масштаб геометрических преобразований должен быть различен по различным осям. Деформация эта должна быть такой, чтобы

$$\varphi_1 = (x, y, z) = m_\varphi \varphi_2(m_x x_2; m_y y_2; m_z z_2). \quad (2.35)$$

Для первой установки, подобие которой отыскивается, уравнение поля имеет вид

$$\varepsilon_{x1} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} + \varepsilon_{y1} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y_1^2} + \varepsilon_{z1} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z_1^2} = 0. \quad (2.36)$$

Для второй установки, которая должна быть подобна первой, уравнение поля с учетом масштабных коэффициентов m может быть записано так:

$$m_\varphi \varepsilon_{x2} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial m_x^2 x_1^2} + m_\varphi \varepsilon_{y2} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial m_y^2 y_1^2} + m_\varphi \varepsilon_{z2} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial m_z^2 z_1^2} = 0. \quad (2.37)$$

Эти уравнения могут быть переписаны:

$$\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \left(\frac{x_1}{\sqrt{\varepsilon_{x1}}}\right)^2} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \left(\frac{y_1}{\sqrt{\varepsilon_{y1}}}\right)^2} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \left(\frac{z_1}{\sqrt{\varepsilon_{z1}}}\right)^2} = 0 \quad (2.38)$$

или

$$\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \left(\frac{m_x x_2}{\sqrt{\varepsilon_{x2}}}\right)^2} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \left(\frac{m_y y_2}{\sqrt{\varepsilon_{y2}}}\right)^2} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \left(\frac{m_z z_2}{\sqrt{\varepsilon_{z2}}}\right)^2} = 0. \quad (2.39)$$

Они будут тождественны, если выполняются условия

$$\frac{x_1}{\sqrt{\varepsilon_{x1}}} = \frac{m_x x_2}{\sqrt{\varepsilon_{x2}}} \quad \text{или} \quad m_x = \frac{x_1}{x_2} \sqrt{\frac{\varepsilon_{x2}}{\varepsilon_{x1}}} \quad (2.40)$$

и соответственно

$$m_y = \frac{y_1}{y_2} \sqrt{\frac{\varepsilon_{y2}}{\varepsilon_{y1}}}; \quad m_z = \frac{z_1}{z_2} \sqrt{\frac{\varepsilon_{z2}}{\varepsilon_{z1}}}. \quad (2.41)$$

Кроме того, в подобных системах существует соотношение

$$\varepsilon_1 \text{grad} \varphi_1 d\bar{S}_1 = m_\varphi \varepsilon_2 \text{grad} \varphi_2 d\bar{S}_2, \quad (2.42)$$

причем,

$$d\bar{S}_1 = \bar{k}_z dx_1 dy_1 \quad (2.43)$$

и соответственно

$$d\bar{S}_2 = \bar{k}_z dx_2 dy_2, \quad (2.44)$$

где \bar{k}_z – орт оси z .

Очевидно, что можно записать соотношения:

$$\varepsilon_1 \text{grad} \varphi_1 d\bar{S}_1 = \varepsilon_{z1} m_\varphi \frac{\partial \varphi_1}{\partial z_1} dx_1 dy_1, \quad (2.45)$$

$$\varepsilon_2 \text{grad} \varphi_2 d\bar{S}_2 = \varepsilon_{z2} m_\varphi \frac{\partial \varphi_2}{\partial z_2} dx_2 dy_2. \quad (2.46)$$

Согласно, этим соотношениям, уравнения можно записать в другом виде:

$$\varepsilon_2 \text{grad} \varphi_2 d\bar{S}_2 = \varepsilon_{z2} m_\varphi \frac{\partial \varphi_1 m_z}{\partial z_1 m_y m_x} \sqrt{\frac{\varepsilon_{z1} \varepsilon_{y2} \varepsilon_{x2}}{\varepsilon_{z2} \varepsilon_{x1} \varepsilon_{y1}}} dx_1 dy_1, \quad (2.47)$$

откуда,

$$\varepsilon_2 = \frac{m_z \sqrt{\varepsilon_{z2}} \sqrt{\varepsilon_{x1} \varepsilon_{y1} \varepsilon_{z1}}}{m_x \sqrt{\varepsilon_{x2}} m_y \sqrt{\varepsilon_{y2}}}. \quad (2.48)$$

Проведенный анализ показывает, что поле в одной анизотропной среде, имеющей параметры ε_{y1} , ε_{y2} , ε_{y3} , аналогично полю в другой анизотропной среде

с параметрами ε_{x1} , ε_{y2} , ε_{z3} , если геометрические координаты подобных точек, т.е. точек, в которых потенциальные функции подобны ($\varphi_1 = m_\varphi \varphi_2$), находятся в определенных соотношениях, установленных из анализа условий подобия. Согласно теории подобия, поля, действующие в изотропной среде, могут быть подобны полям, действующим в анизотропной среде, при особом выборе масштабов пространственных координат и отказе от соблюдения геометрического подобия.

В этом случае координаты x_2 , y_2 , z_2 :

$$x_1 = \frac{x_2}{\sqrt{\varepsilon_x}}; y_1 = \frac{y_2}{\sqrt{\varepsilon_y}}; z_1 = \frac{z_2}{\sqrt{\varepsilon_z}}, \quad (2.49)$$

причем $\sqrt{\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z} \equiv \varepsilon_1$ – физический параметр.

В случае плоскопараллельного поля соотношения упрощаются, так как их приходится устанавливать только между двумя координатами, при этом ε_1 пропорционально корню квадратному из соответствующей пары составляющих ε .

При анализе подобия полей в телах, имеющих аксиальную анизотропию, удобно выбрать оси анизотропии, совмещенные с цилиндрическими осями координат. При этом для подобных плоскопараллельных полей имеется связь между радиусами r_1 и r_2 и физическими параметрами:

$$r_1 = m_1 r_2 \sqrt{\varepsilon_{r2} \varepsilon_{\alpha1} / (\varepsilon_{\alpha2} \varepsilon_{r1})}. \quad (2.50)$$

Кроме того, должно существовать соотношение

$$\varepsilon_{\alpha1} \varepsilon_{r1} / (\varepsilon_{\alpha2} \varepsilon_{r2}) = idem. \quad (2.51)$$

В частном случае, когда одно из сопоставляемых полей действует в изотропной, а другое – в анизотропной среде, необходимо, чтобы

$$r_1 = m_r r_2 \sqrt{\varepsilon_{\alpha1} / \varepsilon_{\alpha2}}, \quad (2.52)$$

$$\sqrt{\varepsilon_{\alpha1} \varepsilon_{r1}} = \varepsilon_2. \quad (2.53)$$

Изложенную теорию подобия можно применить при рассмотрении подобия полей акусто-магнитных аппаратов, где исходят из следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} &= -\mu \frac{dH_x}{dt}, \quad \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\partial H}{\partial z} = \delta_x; \\
\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} &= -\mu \frac{dH_y}{dt}, \quad \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{\partial H}{\partial x} = \delta_y; \\
\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} &= -\mu \frac{dH_z}{dt}, \quad \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial H}{\partial y} = \delta_z.
\end{aligned} \tag{2.54}$$

Часто практический интерес представляет составляющая H_x , причем в отношении остальных двух предполагают, что

$$H_y = H_z = 0. \tag{2.55}$$

Можно также принять, что

$$E_x = E_y = 0; \quad \delta_x = \delta_y = 0. \tag{2.56}$$

Тогда система уравнений переходит в упрощенную, которая после допущений, конкретизирующих задачу, может быть использована для установления соотношения подобия:

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu \frac{dH_y}{dt}, \quad \frac{dH_y}{dz} = 0; \quad \frac{dH_y}{dx} = \delta_z. \tag{2.57}$$

В случае дисперсии магнитной проницаемости для j -й гармоники напряженности и соответственно индукции магнитного поля существует определенная комплексная магнитная проницаемость

$$\mu_k = \mu'_k - j\mu''_k. \tag{2.58}$$

В этом случае необходимо требовать осуществления подобия для каждой гармоники в отдельности, налагая соответствующие условия на геометрические размеры и материал. Легко видеть, что при этом осуществить подобие можно только приближенно и для очень узкого диапазона частот, обеспечив одинаковую зависимость проницаемости и частоты:

$$\mu'(f'_1)/\mu'(f'_k) = \mu'(f_1^2)/\mu'(f_k^2). \tag{2.59}$$

Подобие движущихся электромагнитных полей (электродинамическое подобие). Особое значение имеет установление подобия явлений, происходящих при взаимном перемещении распределенного в пространстве электромагнитного поля и различного рода диэлектриков и проводников или при взаимном перемещении распределенной проводящей среды и диэлектриков.

В случае движущейся диэлектрической среды уравнения Максвелла могут быть записаны следующим образом:

$$\overrightarrow{rot}\vec{H} = \partial\vec{D}/\partial t; \quad (2.60)$$

$$\overrightarrow{rot}\vec{E} = -\partial\vec{B}/\partial t; \quad (2.61)$$

$$\vec{D} = \varepsilon\vec{E} + (\varepsilon - 1/C^2\mu)[\vec{v}\vec{B}]; \quad (2.62)$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} + [\vec{v}\vec{E}]/C^2. \quad (2.63)$$

Сведя уравнения (2.60) – (2.63) к двум, содержащим \vec{H} и \vec{E} , способом интегральных аналогов получим шесть критериев подобия:

$$\pi_{1d} = \varepsilon El/(Ht); \quad (2.64)$$

$$\pi_{2d} = \varepsilon\mu vl/t; \quad (2.65)$$

$$\pi_{3d} = \varepsilon v^2/(C^2 Ht); \quad (2.66)$$

$$\pi_{4d} = v^2 El/(C^4 \mu Ht); \quad (2.67)$$

$$\pi_{5d} = \mu Hl/(Et); \quad (2.68)$$

$$\pi_{6d} = vl/(C^2 t). \quad (2.69)$$

В случае движения проводящих сред система исходных уравнений может быть записана так:

$$\overrightarrow{rot}\vec{H} = \vec{j}; \overrightarrow{rot}\vec{E} = -\partial\vec{B}/\partial t; \quad (2.70)$$

$$\vec{j} = \gamma(\vec{E} + [\vec{v}\vec{B}]); \quad (2.71)$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} + [\vec{v}\vec{E}]/C^2. \quad (2.72)$$

Аналогично, сводя уравнения (2.70) – (2.72) к двум, получаем выражение для критериев подобия:

$$\pi_{1d} = \gamma El/H; \quad (2.73)$$

$$\pi_{2d} = \gamma\mu vl; \quad (2.74)$$

$$\pi_{3d} = \gamma v^2 El/(C^2 H); \quad (2.75)$$

$$\pi_{4d} = \mu Hl/(Et); \quad (2.76)$$

$$\pi_{5d} = vl/(C^2 t). \quad (2.77)$$

Таким образом, для установления подобия явлений, связанных с электродинамикой неподвижных и подвижных сред, существуют критерии полного подо-

бия, отражающие условия геометрического подобия, и критерии неполного подобия, действующие в случаях, когда геометрическое подобие нарушается.

Все критерии электродинамического подобия остаются справедливыми при нелинейных или переменных параметрах, если соблюдено условие идентичности относительных характеристик этих параметров.

Анализ условий подобия тепловых процессов в акусто-магнитном аппарате. Подобие тепловых и электрических цепей. Рассмотрим построение электрической схемы замещения процессов теплопередачи в акусто-магнитном аппарате. Согласно основному закону теплопроводности, количество теплоты Q_T , передаваемое за единицу времени через произвольную изотермическую поверхность $S_{\text{изо}}$, прямо пропорционально градиенту температуры $\text{grad } T$ в направлении теплового потока:

$$q = -\lambda_{\text{тепл}} \text{grad } T, \quad (2.78)$$

где $q = \frac{Q_T}{S_{\text{изо}}}$ – плотность теплового потока, Вт/м²; $\lambda_{\text{тепл}}$ – удельная теплопроводность материала, Вт/(м·К); $\text{grad } T$ – градиент температуры в направлении теплового потока, К/м [152].

При однородном распространении тепла имеем

$$\text{grad } T = \frac{dT}{dx}, \quad (2.79)$$

где x – направление распространения тепла.

Таким образом, имеем следующее выражение:

$$Q_T = -\lambda_{\text{тепл}} S_{\text{изо}} \frac{dT}{dx}. \quad (2.80)$$

Рассматривая однородную стенку толщиной b_c , при отсутствии в ней источников тепла, получим следующее выражение:

$$Q_T = -\lambda_{\text{тепл}} S_{\text{изо}} \frac{T_2 - T_1}{b_c} = \lambda_{\text{тепл}} S_{\text{изо}} \frac{\Theta}{b_c}, \quad (2.81)$$

где T_2 и T_1 – температуры на границах стенки вдоль линии распространения тепла; $\Theta = T_2 - T_1$ – перепад температур на границах стенки.

Конвективный теплообмен между поверхностью твердого тела и газообразной средой связывает плотность теплового потока на поверхности q с температу-

рами поверхности и среды T_n и $T_{охл}$:

$$q = \frac{Q_T}{S_{изо}} = \alpha_T (T_n - T_{охл}) = \alpha_T \cdot \Theta, \quad (2.82)$$

где α_T – коэффициент теплоотдачи поверхности, Вт/(м²°С), характеризующий интенсивность теплообмена.

Соответственно, перепад температуры между поверхностью и охлаждающей средой составит

$$Q_T = \Theta \cdot \alpha_T S_{изо}. \quad (2.83)$$

Введем понятие теплового сопротивления R_m , определяющего перепад температуры (измеряется в °С/Вт). Для однородной стенки

$$R_m = \frac{b_c}{\lambda_{тепл} S_{изо}}, \quad (2.84)$$

для теплоотдачи с поверхности

$$R_m = \frac{1}{\alpha_T S_{изо}}. \quad (2.85)$$

Форма записи этих выражений совпадает с формой записи выражения для электрического сопротивления:

$$R = \rho_{пр} \frac{l_{пр}}{S_{пр}} = \frac{l_{пр}}{\gamma_{пр} S_{пр}}, \quad (2.86)$$

где $\rho_{пр}$ – удельное сопротивление проводника; $\gamma_{пр}$ – удельная проводимость проводника; $l_{пр}$ – длина проводника; $S_{пр}$ – сечение проводника.

Получаем закон Ома для участка тепловой цепи:

$$Q_T = \frac{\Theta}{R_m}. \quad (2.87)$$

При неизменных потерях Q_T , выделяемых в теле, дифференциальное уравнение нагрева однородного тела имеет вид:

$$Q_T d\tau = cG d\Theta + \alpha_T S_{изо} \Theta dt, \quad (2.88)$$

где c – удельная теплоемкость, Дж/(кг°С); G – вес тела, кг.

Представим данное уравнение в виде

$$d\Theta = \frac{1}{cG} (Q_T - \alpha_T S_{изо} \Theta) dt, \quad (2.89)$$

или

$$d\Theta = \frac{1}{C_m} \left(Q_T - \frac{\Theta}{R_m} \right) dt, \quad (2.90)$$

где $C_m = cG$ – теплоемкость однородного тела, Дж/(°С).

Это уравнение изоморфно с уравнением электрической цепи, изображенной на рис.2.10.

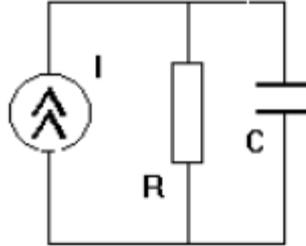


Рисунок 2.10 – Электрическая схема замещения участка тепловой цепи

$$dU_c = \frac{dq_c}{C} = \frac{1}{C} i_c d\tau = \frac{1}{C} \left(I_{\text{ист}} - \frac{U_c}{R} \right) d\tau, \quad (2.91)$$

где U_c – напряжение на конденсаторе, В; q_c – заряд конденсатора, Кл; C – емкость конденсатора, Ф; i_c – ток, протекающей через конденсатор, А; τ – время заряда конденсатора, с; $I_{\text{ист}}$ – ток в ветви с источником тока, А.

Если есть два процесса, описываемые изоморфными уравнениями, то можно построить электрическую схему замещения тепловых процессов [152].

Определим соответствие величин оригинала и модели:

$$Q_T \leftrightarrow I_{\text{ист}}, q \leftrightarrow j, \Theta \leftrightarrow U_c, T \leftrightarrow \varphi, R_m \leftrightarrow R, C_m \leftrightarrow C, t \leftrightarrow \tau, \quad (2.92)$$

где j – плотность тока, А/м².

Для разных участков тепловой цепи тепловое сопротивление вычисляется по-разному, что приводит к разному соответствию величин. Для участков с заданной теплопроводностью [152] имеем

$$\lambda \leftrightarrow \gamma, b_c \leftrightarrow l_{\text{пр}}, S_m \leftrightarrow S_{\text{изо}}, \quad (2.93)$$

для участков с заданной теплопередачей имеем

$$\alpha_T \leftrightarrow \gamma, I_{\text{ист}} \leftrightarrow l_{\text{пр}}, S_m \leftrightarrow S_{\text{изо}}. \quad (2.94)$$

Введем масштабы подобия:

$$m_{Q_T} = \frac{I_{\text{ист}}}{Q_T}, m_{\Theta} = \frac{U_c}{\Theta}, m_R = \frac{R}{R_m}, m_C = \frac{C}{C_m}, m_t = \frac{\tau}{t}. \quad (2.95)$$

Приведем уравнения тепловых и электрических процессов к безразмерному виду

$$\frac{C_m R_m}{\Theta} \frac{d\Theta}{dt} - \frac{R_m Q_T}{\Theta} + 1 = 0, \quad (2.96)$$

$$\frac{CR}{U_c} \frac{dU_c}{d\tau} - \frac{RI_{ист}}{U_c} + 1 = 0. \quad (2.97)$$

Проведём подстановку из первого уравнения во второе величины с соответствующими масштабными коэффициентами:

$$\frac{m_c m_R}{m_t} \frac{C_m R_m}{\Theta} \frac{d\Theta}{dt} - \frac{m_R m_{Q_T}}{m_\Theta} \frac{R_m Q_T}{\Theta} + 1 = 0. \quad (2.98)$$

Для того, чтобы уравнение (2.96) было тождественно уравнению (2.98) необходимо выполнить условия [152]:

$$\begin{cases} \frac{m_c m_R}{m_t} = 1, \\ \frac{m_R m_{Q_T}}{m_\Theta} = 1. \end{cases} \quad (2.99)$$

На основании (2.99) получим выражения критериев подобия:

$$\begin{cases} \pi''_{1t} = \frac{CR}{\tau} = \frac{C_m R_m}{t} = idem, \\ \pi''_{2t} = \frac{RI_{ист}}{U_c} = \frac{R_m Q_T}{\Theta} = idem. \end{cases} \quad (2.100)$$

Величины оригинала имеют следующие размерности:

$$[Q_T] = Bm, [\Theta] = K, [R_m] = \frac{K}{Bm}, [C_m] = \frac{Дж}{K} = \frac{Bm \cdot c}{K}. \quad (2.101)$$

Анализ размерностей обнаруживает, что все пять размерностей могут быть созданы из трех независимых размерностей. Значит, три масштаба могут быть независимыми, а два являются зависимыми. В качестве зависимых удобнее всего выбрать масштабы m_t, m_Θ . Прочим масштабам m_c, m_R, m_Q можно присвоить произвольные значения [152].

Общие условия подобия тепловых процессов. Общим условием подобия тепловых процессов является соблюдение критериев (Фруда, Пекле, Нуссельта, Прандтля)

$$Fr = \frac{at}{l^2}; Pe = \frac{vt}{a}; Nu = \frac{at}{\lambda}; Pr = \frac{\gamma_0}{a}, \quad (2.102)$$

для любых сходственных точек и в любые сходственные моменты времени. При

решении практических задач часть критериев опускается и видоизменяется. Так, при изучении только установившихся тепловых режимов можно опустить первый критерий. В случае неподвижной среды можно опустить второй критерий. Неизменность физических свойств среды (вязкость, плотность) позволяет не учитывать последний критерий.

В ряде практически важных случаев задача установления критерия подобия связана с наличием неоднородной и анизотропной среды. Коэффициент теплопроводности λ_{tenz} в этом случае является тензором. В большинстве случаев можно считать, что неоднородность имеет место только по двум или трем направлениям. Совмещая с ними направления координатных осей, можем записать основное уравнение теплового состояния рассматриваемой конструкции, нагреваемой электрическим током:

$$c\gamma = \frac{d\theta_U}{dt} = g + div(\lambda_{tenz} grad \theta_0), \quad (2.103)$$

где λ_{tenz} – тензор теплопроводности с главными составляющими по координатным осям $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$; θ_0 – температура, отсчитанная от температуры окружающей среды как от нуля; $g = g_0(1 + \beta\theta_0)$ – тепло, выделяемое в единице объема, причем $g_0 = I^2R$ – удельные потери мощности в установившемся режиме при $\theta_0 = 0$; β – температурный коэффициент изменения электрического сопротивления.

В прямоугольной системе координат уравнение (2.103) принимает вид

$$c\gamma \frac{d\theta_0}{dt} = g + \lambda_x \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial z^2}. \quad (2.104)$$

Приводя его к безразмерному виду, получаем следующие критерии подобия:

$$\pi_{1t} = \frac{ax^2}{\lambda_x \theta_0}; \pi_{2t} = \frac{c\gamma}{\lambda_x t}; \pi'_{3t} = \frac{\lambda_y x^2}{\lambda_x y^2}; \pi''_{3t} = \frac{\lambda_z x^2}{\lambda_x z^2}. \quad (2.105)$$

Таким образом, геометрическое подобие здесь не является обязательным условием $\frac{z}{y} \neq \frac{x}{y}$. Однако, отсутствие геометрического подобия корректируется требованием $\frac{z}{y} = \frac{\lambda_z}{\lambda_y}$, которое равносильно введению новых координат $y' = \sqrt{\lambda_x/\lambda_y}$; $z' = z\sqrt{\lambda_x/\lambda_z}$.

Отсутствие геометрического подобия может быть поправлено соответственным подбором значений теплопроводности по главным осям. В условиях $\left(\frac{z}{y} \neq \frac{x}{y}\right)$ и $(\lambda_x \neq \lambda_y \neq \lambda_z)$ полученные критерии подобия π_{1t} и π_{2t} не меняют своего содержания. Критерий $\pi_{2t} = \frac{t_T}{t} = t_{T*}$, где t_T – постоянная времени теплового процесса; t_{T*} – относительная постоянная времени.

Критерий π_{1t} даёт возможность установить связь температуры с количеством выделяющегося тепла и масштаб температуры. Кроме того, должно быть соблюдено подобие условия теплоотдачи на граничной поверхности:

$$\alpha_{Ti} l_0 i / \lambda_{Ti} = idem, \quad (2.106)$$

где α_{Ti} , λ_{Ti} – коэффициент теплоотдачи и теплопроводность окружающей среды; i – индекс, принимающий значения x, y, z в зависимости от того, какая поверхность рассматривается.

При отсутствии геометрического подобия этот критерий видоизменяется: $\alpha_{Ti} grad \theta_o / (\lambda_{Ti} \theta_o) = idem$. Рассмотренные методы определения критериев подобия остаются справедливыми при нелинейности параметров моделируемых систем. При этом необходимо учитывать только непостоянство λ_T или C , используя зависимости $\lambda_T / \lambda_m = \varphi(\theta_o / \theta_m)$ или $C / C_m = \varphi(\theta_o / \theta_m)$, которые должны быть соответственно одинаковыми у подобных процессов [3].

Анализ условий подобия неустановившегося движения несжимаемой жидкости, проходящей через акусто-магнитный аппарат. Соотношения между силами, действующими в движущейся жидкости, устанавливаются в виде уравнений движения жидкости. В каждой точке движущейся жидкости действует определенное значение давления p . Помимо сил, вызванных полем давления, на движущийся элемент жидкости также будет действовать и сила, порождающая движение жидкости. Если гравитация направлена вниз по оси z , то она будет проецироваться на эту ось со знаком минус, ее проекция на другие оси будет равна нулю. Согласно уравнению Ньютона, сила внутреннего трения при слоистом одномерном движении, например вдоль оси x , выражается уравнением

$$\tau_F = \mu_d \frac{\partial \omega_{sx}}{\partial \vec{n}}, \quad (2.107)$$

где μ_d – коэффициент динамической вязкости, ω_{sx} – скорость движения вдоль оси x , \vec{n} – нормаль к движущейся поверхности.

На весь движущийся объём по оси x будет действовать сумма сил:

$$\begin{aligned} & \left[-\tau_F + \left(\tau_F + \frac{\partial \tau_F}{\partial z} dz \right) \right] d_x \cdot d_y + \left[-\tau_F + \left(\tau_F + \frac{\partial \tau_F}{\partial y} dy \right) \right] d_z \cdot d_x + \\ & + \left[-\tau_F + \left(\tau_F + \frac{\partial \tau}{\partial x} dx \right) \right] d_z \cdot d_y. \end{aligned} \quad (2.108)$$

Используя уравнение (2.104), сумму поверхностных сил, порожденных трением и действующих по оси x на движущиеся элемент объёма, можно записать:

$$\mu_d \left(\frac{\partial^2 \omega_{sx}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_{sx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_{sx}}{\partial z^2} \right) dx dy dz. \quad (2.109)$$

Или более кратко $\mu_d \nabla^2 \omega_{sx}$, где ∇^2 – оператор Лапласа: $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$.

Таким образом, в движущейся реальной жидкости на элемент объёма $dx dy dz$ действуют следующие силы:

по оси x

$$\left(-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_d \nabla^2 \omega_{sx} \right) dx dy dz; \quad (2.110)$$

по оси y

$$\left(-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_d \nabla^2 \omega_{sy} \right) dx dy dz; \quad (2.111)$$

по оси z

$$\left[-pg - \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \mu_d \nabla^2 \omega_{sz} \right) \right] dx dy dz. \quad (2.112)$$

Для получения уравнений движения будем использовать основной принцип механики, согласно которому тело находится в состоянии движения, если сумма проекций всех сил, действующих на тело, равна массе тела, умноженной на ускорение. Если плотность движущейся жидкости равна ρ , то масса элементарного объёма равна $\rho dx dy dz$, а ускорение можно представить как производную скорости по времени $\frac{d\omega_s}{dt}$. Разложив ускорение по осям, основной принцип механики можно записать в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \omega_{sx}}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_d \nabla^2 \omega_{sx}; \\ \rho \frac{\partial \omega_{sy}}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_d \nabla^2 \omega_{sy}; \\ \rho \frac{\partial \omega_{sz}}{\partial t} = -\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu_d \nabla^2 \omega_{sz}. \end{cases} \quad (2.113)$$

При неустановившемся движении скорость измерения координат пространства $\omega = f(t, x, y, z)$ полный дифференциал

$$d\omega = \frac{d\omega_s}{dt} dt + \frac{d\omega_s}{dx} dx + \frac{d\omega_s}{dy} dy + \frac{d\omega_s}{dz} dz. \quad (2.114)$$

Это даёт возможность записать ускорение, например, по оси x в виде

$$\frac{\partial \omega_{sx}}{\partial t} = \frac{\partial \omega_{sx}}{\partial t} + \frac{\partial \omega_{sx}}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \omega_{sy}}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial \omega_{sz}}{\partial z} \frac{dz}{dt}. \quad (2.115)$$

Пользуясь этим уравнением и учитывая, что производные координат по времени есть скорости в направлении этих координат, переписываем:

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial \omega_{sx}}{\partial t} + \omega_{sx} \frac{\partial \omega_{sx}}{\partial x} + \omega_{sy} \frac{\partial \omega_{sx}}{\partial y} + \omega_{sz} \frac{\partial \omega_{sx}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_d \nabla^2 \omega_{sx}; \\ \rho \left(\frac{\partial \omega_{sy}}{\partial t} + \omega_{sx} \frac{\partial \omega_{sy}}{\partial x} + \omega_{sy} \frac{\partial \omega_{sy}}{\partial y} + \omega_{sz} \frac{\partial \omega_{sy}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_d \nabla^2 \omega_{sy}; \\ \rho \left(\frac{\partial \omega_{sz}}{\partial t} + \omega_{sx} \frac{\partial \omega_{sz}}{\partial x} + \omega_{sy} \frac{\partial \omega_{sz}}{\partial y} + \omega_{sz} \frac{\partial \omega_{sz}}{\partial z} \right) = -\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu_d \nabla^2 \omega_{sz}. \end{cases} \quad (2.116)$$

Уравнение (2.116) с учётом повторяемости чередования индексов и параметров дифференцирования можно записать путём замены индексов x, y, z цифрами $1, 2, 3$, а параметры дифференцирования x, y, z – на x_1, x_2, x_3 . Введём индексы: $k = \overline{1; 3}$ (номер строки), и $i = \overline{1; 3}$ (номер подобных членов уравнений). Применяя этот способ записи и заменяя в данной точке движущейся жидкости p на сумму пьезометрического давления p_n и нивелирной высоты $p_n + \rho g z$, получаем

$$\rho \left(\frac{\partial \omega_{si}}{\partial t} + \omega_{sk} \frac{\partial \omega_{si}}{\partial x_k} \right) = -\frac{\partial p_n}{\partial x_i} + \mu_d \nabla^2 \omega_{sk}, \quad (2.117)$$

$$\rho \omega_{sk} \frac{\partial \omega_{si}}{\partial x_k} = -\frac{\partial p_n}{\partial x_i} + \mu_d \frac{\partial^2 \omega_{si}}{\partial x_k \partial x_k}.$$

Эта система (уравнения Навье – Стокса) является математической моделью нестационарного движения вязкой несжимаемой жидкости. В общем случае эти уравнения не могут быть решены, так как невозможно определить граничные условия при нестационарном движении вязкой жидкости. Все практические решения задач движения жидкости основаны на этих уравнениях. Эти решения ста-

новятся возможными при использовании метода подобия, который позволяет классу явлений выделить группу сходных между собой, которые подчиняются эмпирическим зависимостям. В этом случае математическая модель, представленная в виде дифференциальных уравнений, служит основой для анализа явлений.

Введем безразмерные переменные:

$$x'_k = x_k/l; p' = p/P_{\text{ж}}; \omega'_{sk} = \omega_{sk}/v; \omega'_{si} = \omega_{si}/v, \quad (2.118)$$

где $l, P_{\text{ж}}, v_{\text{ж}}$ – соответственно характерные длина, давление и скорость.

Эти величины называются масштабами длины, давления и скорости. В новых переменных уравнение Навье – Стокса примет вид:

$$\frac{pv_{\text{ж}}^2}{l} \omega'_{sk} \frac{\partial \omega'_{si}}{\partial x'_k} = -\frac{p}{l} \frac{\partial p'}{\partial x'_i} + \mu_d \frac{v_{\text{ж}}}{l^2} \frac{\partial^2 \omega'_{si}}{\partial x'_k \partial x'_k}. \quad (2.119)$$

Обозначим $P_{\text{ж}}/pv_{\text{ж}}^2 = Eu$; $pv_{\text{ж}}L/\mu_d = Re$. Тогда рассматриваемые уравнения примут вид:

$$\omega'_{sk} \frac{\partial \omega'_{si}}{\partial x'_k} = -Eu \frac{\partial p'}{\partial x'_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \omega'_{si}}{\partial x'_k \partial x'_k}. \quad (2.120)$$

где Eu – число Эйлера; Re – число Рейнольдса.

В гидромеханике доказано, что при описании таких течений числа Эйлера и Рейнольдса, а также сами безразмерные уравнения будут идентичны, и это позволяет называть эти числа числами подобия. Если возникает вопрос об определении значения, одного из чисел, при условии заданного значения второго, то первое число является функцией второго. Например, при определении сопротивления обтекаемого тела по заданным шкалам скорости потока, длины и заданным физическим константам вязкости и плотности жидкости число Эйлера, содержащее неизвестную шкалу давления, по которой определяется сопротивление обтекаемого тела, будет функцией числа Рейнольдса.

Принимая во внимание связь между коэффициентом сопротивления λ и числом Эйлера ($2Eu = \lambda_{\text{тенз}}$), последнее уравнение можно записать так:

$$\lambda_{\text{тенз}} = f(Re). \quad (2.121)$$

Установление связи между числами подобия позволяет решать разнообразные практические задачи. Зависимость (2.121) определяют обычно эксперимен-

тально [41].

Гидромеханическое подобие процессов движения жидкости, характеризующееся критериями Рейнольдса и критерием Эйлера, можно записать следующим образом:

$$\pi_{Re} = \frac{lv\rho}{\mu} = idem, \quad (2.122)$$

$$\pi_{Eu} = \frac{\Delta P}{v_{Eu}^2 \rho} = idem, \quad (2.123)$$

где ΔP – падение давления,

ρ, μ, v_{Eu} – соответственно плотность, вязкость и скорость перемещения жидкости,

l – расстояние перемещения жидкости.

2.2 Получение математической модели процессов, протекающих в акусто-магнитном аппарате

В ходе создания модели находятся критерии подобия для процессов, протекающих в оригинале, при этом необходимо выделить из их числа определяющие критерии. С точки зрения математики безразлично, какой из $m-k$ критериев подобия, полученных на базе π – теоремы, считать определяющим. Приступая к созданию моделей, необходимо выбрать определяющие критерии, учитывая возможность их практической реализации на модели. Критерии, содержащие требуемые параметры процесса, являются следствием, а не предпосылкой сходства, должны рассматриваться как функции определяющих критериев. Определяющие критерии подобия должны состоять из заданных параметров элементов системы и независимых параметров процесса.

Критерии подобия играют двойную роль. Во-первых, они используются для определения масштабов, связывающих параметры модели и оригинала. Во-вторых, на основе анализа критериальных соотношений выявляются наиболее характерные свойства моделируемого явления. Критерии могут быть найдены

либо по π -теореме, либо методом интегральных аналогов.

Опыты на модели, основанные на теории подобия, могут уточнять уравнения той системы, по элементам которой были найдены критерии подобия до этих опытов. Однако, степень точности воспроизведения физических явлений на моделях может быть различной. Она определяется степенью полноты имеющихся знаний об оригинале и теми задачами, которые ставит перед собой исследователь. Абсолютно точная модель, так же как и абсолютное подобие, является математической абстракцией. Это означает, что модель и отождествляемый при её помощи объект находятся в отношении сходства, а не тождества. Именно потому, что модель в какой-то степени отлична от оригинала, создаётся возможность отыскивать и выделять определенные, наиболее существенные связи и отношения, подсказывать определенные решения, более легко и доступно видоизменять условия. В соответствии с поставленной задачей из возможных методов полного, неполного или приближённого подобия и соответствующего ему полного, неполного и приближенного моделирования следует выбрать метод, наилучшим образом отвечающий и задачам исследования, и возможностям исследователя [38].

Исследуя явления, происходящие в акусто-магнитном аппарате (рисунок 2.2-2.5), путём физического моделирования, перенесём полученные результаты на объекты той же физической природы, но отличающиеся по электрическим, магнитным и другим показателям. Необходимо понимать, что полное физическое подобие получить невозможно, поэтому остаётся использовать приближённое подобие, т.е. подобие по определенным показателям.

Выполняя моделирование, необходимо знать, в какой степени модель соответствует реальному объекту или процессу, и какие параметры необходимы после проведения экспериментов. Также нужно учесть все влияющие и не влияющие факторы. Только при таких условиях, выполненных на модели, можно будет определить характеристики оригинала. Получить ответы на поставленные вопросы можно только путем анализа сходства. При физическом моделировании акусто-магнитного аппарата геометрическое подобие, в ряде случаев, произвести затруднительно. Более удобны обобщенные геометрические параметры, такие как

поперечное сечение окна обмотки, площадь поверхности, средняя длина катушки и др. При таком подходе существует возможность создания системы, не имеющей сходства. В то же время результаты экспериментов видны более четко. Становится легче следить за влияющими факторами, в то же время получаем свободу при доведении конструкции акусто-магнитного аппарата до поставленной цели, так как легче варьировать обобщенные геометрические параметры, чем конструктивные размеры. Нашей задачей является выявление факторов, влияющих на характеристики акусто-магнитного аппарата, с целью передачи полученных результатов на модель от оригинала, а также нахождение изменений характеристик аппарата в нужном направлении.

В соответствии с третьей теоремой подобия выбираем критерии подобия по всем показателям, обеспечивающим подобие модели предполагаемому оригиналу. Новая модель проектируется, базируясь на выбранных критериях. Затем планируется эксперимент и регистрируются все величины, входящие в критерии подобия. Экспериментальные данные обрабатываются в критериальной форме. Чтобы определить с помощью критериев масштабы перехода, характеристики модели записываются в натуральной форме. Пересчет параметров подобия производится посредством определения характеристик интересующих исследователя параметров для одной точки. Для остальных точек пересчет параметров производится при помощи констант подобия, определенных для сходных точек по модели.

У всех показателей есть один существенный недостаток, связанный с узким диапазоном конструкций, работающих в определенных условиях. Критерии подобия, являясь безразмерными комплексами, содержат в своём составе величины, которые должны быть измерены на опыте, чтобы результаты опытов были сопоставимы. Данные, полученные в экспериментах, записанные в критериальной форме, могут быть востребованы при обобщении результатов экспериментов с целью создания новых конструкций или сравнения с существующими. Для создания новых конструкций необходимо рассмотреть подобия: геометрическое, электромагнитное, тепловое, механическое.

При модификации габаритов электроконструкций видоизменение индукции, температуры обмотки, плотности тока непропорционально. Если существующая конструкция целесообразна, то подобная ей, но других размеров, может быть не работоспособной, или, по крайней мере, не рациональной. Исходя из сказанного, основная задача представляется в подборе подходящих для новой конструкции критериев подобия.

Для того, чтобы определить и построить критериальные зависимости, нужно исследовать явление акусто-магнитного поля, пользуясь рядом критериев $\pi_1 \pi_2 \pi_3 \pi_4 \dots \pi_n$, установленных согласно условию однозначности. В проводимых опытах были измерены величины, которые содержатся в критериях подобия изучаемого явления, а результаты исследования представлены в виде критериальных зависимостей.

Процессы, протекающие в акусто-магнитном поле, можно охарактеризовать следующими критериями подобия:

- обобщенными критериями геометрических параметров разных типов и конструкций акусто-магнитного аппарата;
- критериями, связывающими физические параметры, внешней среды и акусто-магнитного аппарата;
- критерием, устанавливающим отношение температуры окружающей среды к тепловому режиму работы аппарата;
- критериями, устанавливающими начальное состояние цепи, содержащей взаимные индуктивности;
- критерием, устанавливающим условия на границах системы и кавитирующей жидкости.

Если процесс или явление аналитически характеризуется одним многочленным выражением, то число критериев, которое определяется этим выражением, на один меньше числа его членов. При этом, так как относительный вес членов, входящих в выражение, может быть различным, различен будет и вес соответствующих критериев подобия. Однако из анализа самих критериев это обстоятельство обнаружить нельзя. Его можно выявить только в результате деталь-

ного анализа исходного выражения, характеризующего процесс.

Рассмотрим процесс установления критериев начального состояния цепи, в которой имеются взаимные индуктивности. рассмотрим цепь, состоящую из четырёх контуров: первый из них имеет параметры R_1, L_1, I_1 и включается на импульсное напряжение U_1 , второй контур R_2, L_2, I_2 , включается на импульсное напряжение U_2 , третий контур R_3, L_3, I_3 включается на импульсное напряжение U_3 и четвертый – контур, характеризующейся параметрами R_4, R_H, L_4, I_4 . В целом схема является системой, состоящей из четырёх подсистем (контуров 1,2,3,4). На рисунке 2.11 представлена схема замещения электромагнитной составляющей акусто-магнитного аппарата, представленного на рисунках 2.2-2.5 [76].

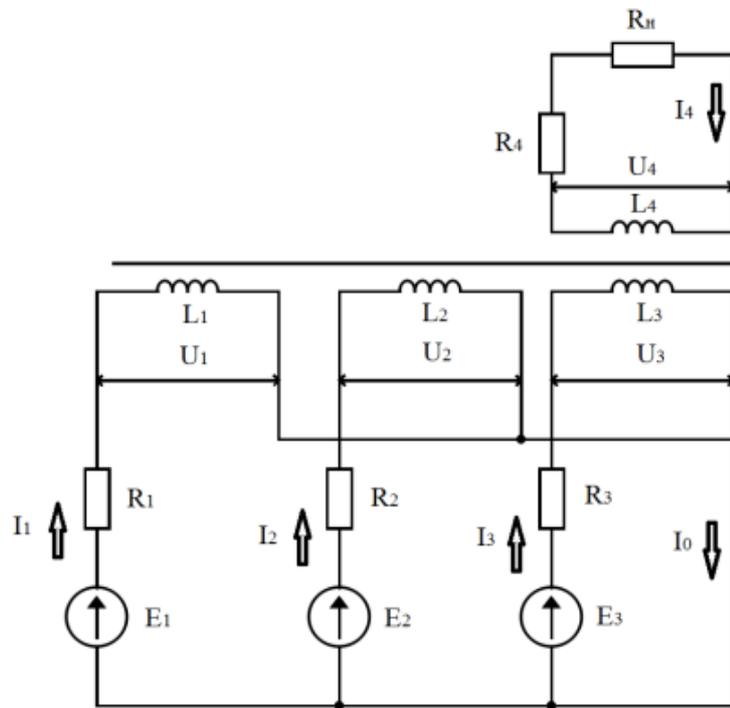


Рисунок 2.11 – Схема замещения электромагнитной составляющей акусто-магнитного аппарата

Источники напряжения E_1, E_2, E_3 , выдают прямоугольный сигнал одной частоты со смещением во времени на одну третью 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

(разделив период на шесть равных частей) на акусто-магнитный аппарат можно записать в виде:

$$\frac{1}{6}T: E1=1, E2=0, E3=1; \frac{2}{6}T: E1=1, E2=0, E3=0; \frac{3}{6}T: E1=1, E2=1, E3=0;$$

$$\frac{4}{6}T: E1=0, E2=1, E3=0; \frac{5}{6}T: E1=0, E2=1, E3=1; T: E1=0, E2=0, E3=1.$$

Временную диаграмму работы источников напряжения в цепи акусто-магнитного аппарата можно увидеть на рисунке 2.12.

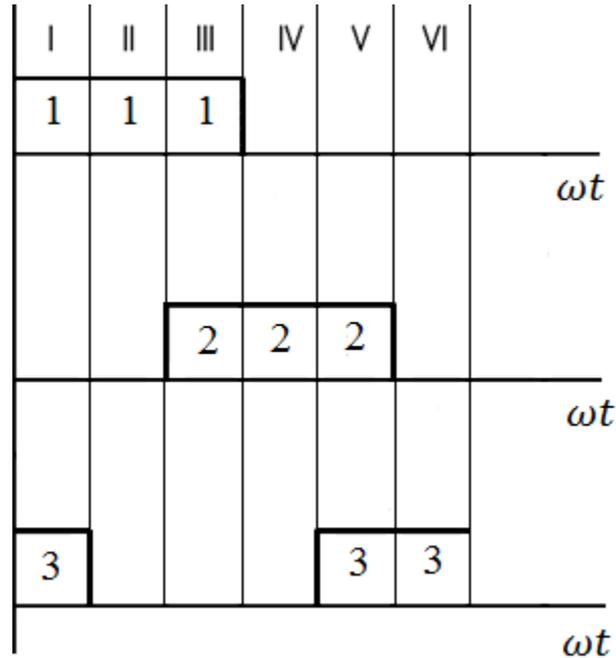


Рисунок 2.12 – Временные диаграммы работы источников напряжения в цепи акусто-магнитного аппарата

$$\begin{cases} u_1 = I_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{14} \frac{di_4}{dt} \\ u_2 = I_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{24} \frac{di_4}{dt} \\ u_3 = I_3 R_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{34} \frac{di_4}{dt} \end{cases} \quad (2.124)$$

$$\begin{cases} 0 = I_4 R'_4 + L_4 \frac{di_4}{dt} - M_{14} \frac{di_1}{dt} \\ 0 = I_4 R'_4 + L_4 \frac{di_4}{dt} - M_{24} \frac{di_2}{dt} \\ 0 = I_4 R'_4 + L_4 \frac{di_4}{dt} - M_{34} \frac{di_3}{dt} \end{cases} \quad (2.125)$$

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 , $R'_4 = R_4 + R_H$ [76].

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

$$W_m = \frac{L_1 I_1^2}{2} + \frac{L_2 I_2^2}{2} + \frac{L_3 I_3^2}{2} \pm M_{12} I_1 I_2 \pm M_{13} I_1 I_3 \pm M_{23} I_2 I_3, \quad (2.126)$$

Общий ток в цепи может принимать значения:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_3, \dot{I}_0 = \dot{I}_1, \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2, \dot{I}_0 = \dot{I}_2, \dot{I}_0 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3, \dot{I}_0 = \dot{I}_3. \quad (2.127)$$

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

$$\begin{cases} \dot{I}_1(R_1 + j\omega L_1) + \dot{I}_2 j\omega M_{12} = \dot{E}_1 \\ \dot{I}_1 j\omega M_{12} + \dot{I}_2(R_2 + j\omega L_2) = \dot{E}_2 \end{cases}. \quad (2.128)$$

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

$$\begin{cases} \dot{I}_1(R_1 + j\omega L_1) + \dot{I}_3 j\omega M_{13} = \dot{E}_1 \\ \dot{I}_1 j\omega M_{13} + \dot{I}_3(R_3 + j\omega L_3) = \dot{E}_3 \end{cases}. \quad (2.129)$$

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

$$\begin{cases} \dot{I}_2(R_2 + j\omega L_2) + \dot{I}_3 j\omega M_{23} = \dot{E}_2 \\ \dot{I}_2 j\omega M_{23} + \dot{I}_3(R_3 + j\omega L_3) = \dot{E}_3 \end{cases}. \quad (2.130)$$

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

Решим поставленную задачу подобия цепей. Согласно первому дополнительному положению, системы подобны, если соответственно подобны составляющие их подсистемы. Рассмотрим состояние системы в момент времени $\frac{2}{6}T$, которое можно описать системой уравнений:

$$\begin{cases} u_1 = I_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{14} \frac{di_4}{dt}; \\ 0 = I_4 R'_4 + L_4 \frac{di_4}{dt} - M_{14} \frac{di_1}{dt}. \end{cases} \quad (2.131)$$

Применим способ интегральных аналогов [38]. Находим пять критериев подобия, разделив соответственно на $I R_1$ и $I_4 R'_4$ уравнения системы (2.131):

$$\pi_1^y = \frac{U}{I_1 R_1} = \frac{I_1^\infty}{I_1}; \pi_2^y = \frac{L_1}{R_1 t} = \frac{T_{L_1}}{t}; \pi_3^y = \frac{M_{14}}{R_1 t} \cdot \frac{I_4}{I_1} = \frac{T_{M_1}}{t} \cdot \frac{I_4}{I_1}; \pi_4^y = \frac{L_4}{R_4' t} = \frac{T_{L_4}}{t};$$

$$\pi_5^y = \frac{M_{14}}{R_4' t} \cdot \frac{I_4}{I_4} = \frac{T_{M_4}}{t} \cdot \frac{I_2}{I_4}, \quad (2.132)$$

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

Установим критерии подобия с помощью π – теоремы. При этом необходимо принять во внимание все параметры, которые характеризуют все элементы и процессы, протекающие в этих контурах.

Для первого контура это будет 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 получим семь критериев подобия:

$$\pi_1 = \frac{U}{I_1 R_1}; \pi_2 = \frac{L_1}{R_1 t}; \pi_3 = \frac{M_{14}}{R_1 t}; \pi_4 = \frac{I_4}{I_1}; \pi_5 = \frac{L_4}{R_4' t}; \pi_6 = \frac{M_{14}}{R_4' t}; \pi_7 = \frac{I_1}{I_4}. \quad (2.133)$$

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 π –теоремы (π_1, π_2, π_5). Запишем критериальные уравнения, соответствующие контурам 1 и 4:

$$\pi_1 = f_1(\pi_2, \pi_3, \pi_4); \pi_7 = f_2(\pi_5, \pi_6). \quad (2.134)$$

Выражение критерия π_7 эквивалентно критерию π_4 . В итоге получим для момента времени $\frac{2}{6}T$ критериальное уравнение:

$$(U_1)\pi_1 = f_3(\pi_2\pi_3\pi_5\pi_6). \quad (2.135)$$

Для подобия процессов необходимо и достаточно выполнения равенства четырёх определяющих критериев:

$$\pi_2 = \frac{T_{L_1}}{t}; \pi_3 = \frac{T_{M_1}}{t}; \pi_5 = \frac{T_{L_4}}{t}; \pi_6 = \frac{T_{M_4}}{t}. \quad (2.136)$$

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 имеет вид:

$$(U_3)\pi_{15}=f_9(\pi_{16}, \pi_{17}, \pi_5, \pi_{20}). \quad (2.137)$$

Установим критерии подобия в момент времени $\frac{1}{6}T$.

$$\begin{cases} u_1 = I_1 R_1 + \frac{d}{dt}(L_1 I_1 + M_{13} I_3 + M_{14} I_4); \\ u_3 = I_3 R_3 + \frac{d}{dt}(L_3 I_3 + M_{34} I_4 + M_{31} I_1). \end{cases} \quad (2.138)$$

При делении уравнений на вторые члены получим по четыре критерия подобия из каждого уравнения:

$$\begin{cases} \pi_{22}^{y1} = \frac{U_1}{I_1 R_1}; \pi_{23}^{y1} = \frac{L_1}{R_1 t_1}; \pi_{24}^{y1} = \frac{M_{14}}{R_1 t_1} \cdot \frac{I_4}{I_1}; \pi_{25}^{y1} = \frac{M_{13}}{R_1 t_1} \cdot \frac{I_3}{I_1}; \\ \pi_{22}^{y2} = \frac{U_3}{I_3 R_3}; \pi_{23}^{y2} = \frac{L_3}{R_3 t_3}; \pi_{24}^{y2} = \frac{M_{31}}{R_3 t_3} \cdot \frac{I_1}{I_3}; \pi_{25}^{y2} = \frac{M_{34}}{R_3 t_3} \cdot \frac{I_4}{I_3}. \end{cases} \quad (2.139)$$

$$\pi_{22} = \frac{M_{13}}{R_1 t}; \pi_{23} = \frac{I_3}{I_1}; \pi_{24} = \frac{M_{31}}{R_3 t_3}; \pi_{25} = \frac{I_1}{I_3}. \quad (2.140)$$

При этом $\pi_{22}^{y1} = \frac{U_1}{I_1 R_1} = \pi_1$; $\pi_{23}^{y1} = \frac{L_1}{R_1 t_1} = \pi_2$; $\pi_{24}^{y1} = \pi_{26} = \pi_{20} \cdot \pi_4$; $\pi_{25}^{y1} = \pi_{27} = \pi_{22} \cdot \pi_{23}$; $\pi_{22}^{y2} = \pi_{15}$; $\pi_{23}^{y2} = \pi_{16}$; $\pi_{24}^{y2} = \pi_{28} = \pi_{24} \cdot \pi_{25}$; $\pi_{25}^{y2} = \pi_{29} = \pi_{22} \cdot \pi_{23}$.

В итоге получим критериальное уравнение для момента времени $\frac{1}{6}T$:

$$(U_1, U_3)\pi_{30}=f_{10}(\pi_1, \pi_2, \pi_{15}, \pi_{16}, \pi_{17}, \pi_{26}, \pi_{27}, \pi_{28}, \pi_{29}). \quad (2.141)$$

Установим критерии подобия в момент времени $\frac{3}{6}T$:

$$\begin{cases} u_1 = I_1 R_1 + \frac{d}{dt}(L_1 I_1 + M_{12} I_2 + M_{14} I_4); \\ u_2 = I_2 R_2 + \frac{d}{dt}(L_2 I_2 + M_{21} I_1 + M_{24} I_4). \end{cases} \quad (2.142)$$

При делении уравнений на вторые члены получим по четыре критерия подобия из каждого уравнения:

$$\begin{cases} \pi_{22}^{y3} = \frac{U_1}{I_1 R_1}; \pi_{23}^{y3} = \frac{L_1}{R_1 t_3}; \pi_{24}^{y3} = \frac{M_{12}}{R_1 t_3} \cdot \frac{I_2}{I_1}; \pi_{25}^{y3} = \frac{M_{14}}{R_1 t_3} \cdot \frac{I_4}{I_1}; \\ \pi_{22}^{y4} = \frac{U_2}{I_2 R_2}; \pi_{23}^{y4} = \frac{L_2}{R_2 t_3}; \pi_{24}^{y4} = \frac{M_{21}}{R_2 t_3} \cdot \frac{I_1}{I_2}; \pi_{25}^{y4} = \frac{M_{24}}{R_2 t_3} \cdot \frac{I_4}{I_2}. \end{cases} \quad (2.143)$$

$$\pi_{31} = \frac{M_{12}}{R_1 t}; \pi_{32} = \frac{I_2}{I_1}; \pi_{33} = \frac{M_{21}}{R_2 t_3}; \pi_{34} = \frac{I_4}{I_1}; \pi_{35} = \frac{I_1}{I_2}. \quad (2.144)$$

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

В итоге получим критериальное уравнение для системы в цепи в момент времени $\frac{3}{6}T$:

$$(U_1, U_2)\pi_{40}=f_{11}(\pi_1, \pi_2, \pi_8, \pi_9, \pi_{36}, \pi_{37}, \pi_{38}, \pi_{39}). \quad (2.145)$$

Установим критерии подобия в момент времени $\frac{5}{6}T$.

$$\begin{cases} u_3 = I_3 R_3 + \frac{d}{dt}(L_3 I_3 + M_{34} I_4 + M_{32} I_2); \\ u_2 = I_2 R_2 + \frac{d}{dt}(L_2 I_2 + M_{24} I_4 + M_{23} I_3). \end{cases} \quad (2.146)$$

При делении уравнений на вторые члены получим по четыре критерия подобия из каждого уравнения:

$$\begin{cases} \pi_{22}^{y5} = \frac{U_3}{I_3 R_3}; \pi_{23}^{y5} = \frac{L_3}{R_3 t_5}; \pi_{24}^{y5} = \frac{M_{34}}{R_1 t_5} \cdot \frac{I_4}{I_3}; \pi_{25}^{y5} = \frac{M_{32}}{R_1 t_5} \cdot \frac{I_2}{I_3}; \\ \pi_{22}^{y6} = \frac{U_2}{I_2 R_2}; \pi_{23}^{y6} = \frac{L_2}{R_2 t_5}; \pi_{24}^{y6} = \frac{M_{24}}{R_2 t_5} \cdot \frac{I_4}{I_2}; \pi_{25}^{y6} = \frac{M_{23}}{R_2 t_5} \cdot \frac{I_3}{I_2}. \end{cases} \quad (2.147)$$

$$\pi_{41} = \frac{M_{34}}{R_1 t}; \pi_{42} = \frac{I_2}{I_3}; \pi_{43} = \frac{M_{32}}{R_1 t_5}; \pi_{44} = \frac{M_{23}}{R_2 t_5}; \pi_{45} = \frac{I_3}{I_2}. \quad (2.148)$$

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

Получим критериальное уравнение для системы в цепи в момент времени

$$\frac{5}{6}T: (U_2, U_3)\pi_{50}=f_{12}(\pi_1, \pi_2, \pi_8, \pi_9, \pi_{36}, \pi_{37}, \pi_{38}, \pi_{39}). \quad (2.149)$$

Окончательный критерий, устанавливающий начальное состояние цепи, содержащей взаимные индуктивности:

$$\pi_{51}=f_{13}(\pi_1, \pi_8, \pi_{15}, \pi_{30}, \pi_{40}, \pi_{50}). \quad (2.150)$$

Критерии, связывающие физические параметры внешней среды акусто-магнитного аппарата. Магнотриксционная деформация сложным образом зависит от индукции и напряженности магнитного поля. Поскольку деформация ферромагнитного сердечника определяется модулем внешнего магнитного поля, то при наложении знакопеременного поля с частотой изменения f размеры сердечника изменяются от минимального до максимального значения с частотой $2f$. Согласно общей теории электро-акустических преобразователей полная

система уравнений магнитоэлектрического преобразователя примет вид:

$$U = z_{\text{э}} i - \frac{na_{\text{мс}}}{R_{\text{маг}}} v, \quad (2.151)$$

$$\tilde{F} = \frac{na_{\text{мс}}}{R_{\text{маг}}} i - \frac{C_{\text{м}}}{p} v, \quad (2.152)$$

где $z_{\text{э}} = z_0 + \frac{pn^2}{R_{\text{маг}}}$ – электрическое сопротивление заторможенного преобразователя; $C_{\text{м}} = C_{\text{уп}} - \frac{a_{\text{мс}}^2}{R_{\text{маг}}}$ – упругость при постоянной магнитодвижущей силе; $a_{\text{мс}}$ – магнитоэлектрическая постоянная; z_0 – электрическое сопротивление обмотки магнитоэлектрического преобразователя; $C_{\text{уп}}$ – упругость преобразователя; p – оператор $\frac{d}{dt}$.

Так, при сигнале типа меандр $p = \frac{d}{dt} = is(t)$, где $s(t) = \frac{4A}{\pi} \left(\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t \dots \right)$, A – амплитуда меандра.

Входное электрическое сопротивление преобразователя вычисляется по формуле [2]:

$$z = z_0 + \frac{is(t)L_{\text{хх}}}{1 + a_{\text{мс}}^2 / (R_{\text{маг}}(C - s(t)^2 m) - is(t)r)}, \quad (2.153)$$

где $L_{\text{хх}}$ – индуктивность холостого хода аппарата.

Магнитное сопротивление вычисляется по формуле:

$$R_{\text{маг}} = -\frac{\mu_{\text{фер}} l_{\text{маг}}}{k_{\text{м}} S}, \quad (2.154)$$

где $l_{\text{маг}}$ – длина магнитопровода, $\mu_{\text{фер}}$ – магнитная проницаемость феррита [2].

Рассчитать начальную магнитную проницаемость ферритового кольца можно по методике пробной обмотки. Методика расчета состоит в следующем: сначала на кольцо наматывается некоторое целое количество витков (не менее 5 витков, т.к. чем больше витков, тем выше точность измерения магнитной проницаемости). Далее измеряется индуктивность полученной катушки, по формуле для расчета вычисляется магнитная проницаемость. Формула для расчета:

$$\mu = 2500L(D_{\text{нар}} + D_{\text{вн}}) / (d(D_{\text{нар}} - D_{\text{вн}})n^2) \quad (2.155)$$

где $D_{\text{нар}}$ – внешний диаметр кольца, мм; $D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр кольца, мм.

Известно [19], что при прямоугольном напряжении мощность на входе акусто-магнитного аппарата обусловлена только первой гармоникой тока. Отношение реактивной составляющей напряжения на зажимах аппарата (одна фаза) к напряжению на входе всей цепи:

$$\pi_{52} = \frac{U_p}{U_{\text{вх}}}. \quad (2.156)$$

Параметр аппарата, равный отношению падения напряжения на активном сопротивлении обмотки (одна фаза) ко всему напряжению, приложенному к зажимам аппарата:

$$\pi_{53} = \frac{U_{\text{акт}}}{U_{\text{вх}}}. \quad (2.157)$$

Отношение реактивной составляющей напряжения на зажимах аппарата к падению напряжения на активном сопротивлении обмотки путем деления критерия π_{53} на π_{52}

$$\pi_{54} = \frac{\pi_{53}}{\pi_{52}} = \frac{U_{\text{акт}}}{U_p}. \quad (2.158)$$

Выражение, связывающее выходной параметр – силу \tilde{F} и входной – ток i формула (2.122). Измерение силы \tilde{F} в магнестрикционных преобразователях связано с некоторыми трудностями, вследствие её непрерывного изменения. В тех случаях, когда необходимо детально изучить закон изменения силы, мгновенные значения силы могут измеряться с помощью малоинерционных тензометрических датчиков, преобразовываться в электрический сигнал и записываться с помощью осциллографа.

Т.к. напряжение на электрическом входе $U = i\omega nS4\pi\tilde{f}$ [2], то из (1.43) непосредственно следует критерий подобия, характеризующий зависимость входного с выходным параметром:

$$\pi_{55} = \frac{4\pi nSk_m a_{\text{мс}} i}{\tilde{F}R_{\text{нар}}}. \quad (2.159)$$

Намагниченность выразим через деформацию ε , связанную с колебатель-

ной скоростью на механическом выходе v формула (2.152).

Колебательная скорость на механическом выходе выведем из формулы (2.151):

$$v = \frac{U}{a_{mc} k_m \frac{4\pi n S}{R_{нар}}}, \quad (2.160)$$

где a_{mc} – магнестрикционная постоянная [2].

Получим критерий подобия для зависимости между переменными выражения (1.55), используя условие подобия:

$$\pi_{56} = \frac{4\pi n S k_m a_{mc} v}{U R_{нар}}. \quad (2.161)$$

Воспользуемся свойством, заключающемся в том, что критерии подобия любого явления могут преобразовываться в критерии другой формы, получаемые за счет операций перемножения или деления критериев, возведением их в степень или умножения на любой постоянный коэффициент k [52].

Получим критерий, связывающий физические параметры, поступающие из среды с выходными параметрами аппарата путем деления критерия π_{56} на π_{55} :

$$\pi_{57} = \frac{\pi_{56}}{\pi_{55}} = \frac{4\pi n S k_m a_{mc} v}{U R_{нар}} \cdot \frac{\bar{F} R_{нар}}{4\pi n S k_m a_{mc} i} = \frac{v \bar{F}}{U i}. \quad (2.162)$$

Считая, что для напряжения питания формы меандр уравнение электрической цепи для мгновенных значений токов имеет вид:

$$U = ir + \frac{4e}{\pi} \left(\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t \dots \right)^2 \frac{d(iG)}{dt}. \quad (2.163)$$

Величина $\frac{4e}{\pi} \left(\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t \dots \right)^2 \frac{d(iG)}{dt} = \frac{dE}{dt}$ экспериментально может быть определена следующим образом. При намотке катушки магнестрикционного излучателя укладывается тонкий провод измерительной обмотки, который имеет такое же количество витков и расположен так же, как и основной провод обмотки. В процессе работы магнестрикционного излучателя величина ЭДС на измерительной обмотке будет пропорциональна величине $\frac{dE}{dt}$, ЭДС самоиндукции. Сопротивление r является приведенным активным сопротивлением системы. Действующее значение его может быть определено по показаниям ампер-

метра, вольтметра и специального малоконусного ваттметра, рассчитанного на проведение измерений при низком коэффициенте мощности, который обычно имеет место у катушек с ферромагнитным сердечником.

Длина пути жидкости в активной зоне аппарата соответствует высоте цилиндра акусто-магнитного аппарата [150]:

$$L_{\text{акз}} = h_{\text{АМА}} = v_{\text{акз}} \tau_{\text{акз}}, \quad (2.164)$$

где $v_{\text{акз}}$ – заданный параметр скорости воды в рабочем зазоре аппарата; $\tau_{\text{акз}}$ – заданное время прохождения жидкости через активную зону аппарата.

Площадь проходного сечения воды в рабочем зазоре (для определения диаметра трубы, проходящей через рабочую зону аппарата обработки жидкости) [150]:

$$S_{\text{в}} = \frac{Q_{\text{воды}}}{0,36v_{\text{акз}}m}, \quad (2.165)$$

где $Q_{\text{воды}}$ – часовой расход воды; m – число включенных параллельно рабочих зазоров (определяется на основании приближённых расчётов).

Внутренний диаметр корпуса акусто-магнитного аппарата:

$$d_{\text{вн}} = \frac{S_{\text{в}}}{\pi r_{\text{АМА}}} + r_{\text{АМА}}, \quad (2.166)$$

где $r_{\text{АМА}}$ – высота проходного сечения акусто-магнитного аппарата.

$$\pi_L = \frac{v_{\text{акз}} \tau_{\text{акз}}}{L_{\text{акз}}}. \quad (2.167)$$

Критерии, устанавливающие отношение температуры окружающей среды к тепловому режиму работы устройства. При проектировании акусто-магнитного аппарата (АМА) необходимо учитывать температуру перегрева, поскольку она вызывает ускоренное старение и выход аппарата из строя. Слишком малое значение приводит к увеличению расхода провода для обмоток и увеличению стоимости изделия. Установлено значение температуры перегрева аппарата в зависимости от эффективности теплоотвода от его поверхности. КПД определяется коэффициентом теплопередачи α , который характеризует мощность, отводимую от поверхностного блока при изменении температуры на один градус. Теплообмен аппарата с окружающей средой происходит через

боковые и торцевые поверхности. В общем случае, чтобы установить условия охлаждения, необходимо, ввести свой коэффициент теплопередачи для каждой поверхности аппарата. Теплообмен тороидального аппарата с окружающей средой осуществляется через две боковые и две торцевые поверхности. Поскольку, заранее неизвестно, какие факторы и как будут влиять на значения коэффициентов теплопередачи в конкретных условиях эксплуатации, будем считать, что условия охлаждения АМА одинаковы по всей поверхности, а все коэффициенты теплопередачи равны между собой: $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_0$.

АМА имеет следующие геометрические размеры: $R_{\text{внАМА}}$ – радиус окна (рабочая зона), $R_{\text{нарАМА}}$ – внешний радиус, $h_{\text{АМА}}$ – высота АМА.

Из работы [77] можно применить выражение для расчета АМА. Установившаяся температура перегрева тороидального трансформатора:

$$\Theta_V - T_0 = \frac{r_0 i^2 + P_c}{\alpha_0 F_0 - \chi r_0 i^2}, \quad (2.168)$$

где r_0 – полное сопротивление аппарата, χ – температурный коэффициент сопротивления, Θ_V – средняя температура по объёму аппарата, T_0 – температура окружающей среды; F_0 – площадь поверхности аппарата, $r_0 i^2 + P_c$ – полная мощность потерь, P_c – потери в магнитопроводе.

Полное сопротивление аппарата равно значению входного электрического сопротивления преобразователя z (исходя из формулы (2.153)). Мощность, теряемую за счет вихревых токов P_B , можно подсчитать по формуле [76]:

$$P_B = \frac{\delta_1}{\rho} \cdot (d \cdot s(t) B_m \cdot 10^5)^2, \quad (2.169)$$

где δ_1 – коэффициент, зависящий от магнестрикционного материала. Потеря мощности за счет гистерезиса P_r определяется из выражения:

$$P_r = \frac{\delta_2}{\rho} s(t) \cdot 10^{-2} \left(\frac{B_m}{1000} \right)^{1.6}, \quad (2.170)$$

где δ_2 – коэффициент, зависящий от магнестрикционного материала.

$$P_c = P_B + P_r. \quad (2.171)$$

Зависимость (2.169) реализуется, если знаменатель дроби положителен. Это

выражение включает в себя площадь поверхности аппарата. Предположим, что размер площади устройства и магнитопровода постоянен и не зависит от мощности устройства. Введём коэффициент подобия как отношение площадей аппарата и магнитопровода:

$$\pi_{58} = \frac{F_0}{F}, \quad (2.172)$$

где F – площадь поверхности магнитопровода.

Подставим в выражение (2.169) значение F_0 , выраженное из (2.172), получим:

$$\Theta_V - T_0 = \frac{r_0 i^2 + P_c}{\pi_{58} \alpha_0 F - \chi r_0 i^2}. \quad (2.173)$$

Введем обобщенный коэффициент подобия теплообмена $\pi_{59} = \pi_{58} \alpha_0$, тогда установившаяся температура перегрева акусто-магнитного аппарата может быть найдена по формуле:

$$\Theta_V - T_0 = \frac{r_0 i^2 + P_c}{\pi_{59} F - \chi r_0 i^2}. \quad (2.174)$$

Полное значение тока акусто-магнитного аппарата состоит из активной и реактивной составляющей [77]:

$$i_0 = \sqrt{\left(\frac{m_c P_0}{E}\right)^2 + \left(\frac{El}{2\pi s(t)\mu_0 \mu S n^2}\right)^2}, \quad (2.175)$$

где E – ЭДС обмоток аппарата, m_c – масса магнитопровода, P_0 – удельная мощность потерь в феррите.

Вес излучателя m_c определяется из выражения:

$$m_c = \frac{\pi \rho_c h k_c}{4} \left((2R_{\text{нарАМА}})^2 - (2R_{\text{внАМА}})^2 \right), \quad (2.176)$$

где ρ_c – плотность феррита.

Величину P_0 можно определить из формулы [77]:

$$P_c = m_c P_0. \quad (2.177)$$

Расчитывая параметры акусто-магнитного аппарата, на высоких частотах можно встретиться с поверхностным эффектом, тогда активное сопротивление аппарата можно рассчитать по формуле [77]:

$$r_0 = \rho_{\text{пр}} \frac{n_{\text{вит}} l_0 n_k k_r}{S_{\text{пр}}}, \quad (2.178)$$

где $n_{\text{вит}}$ – число витков одной катушки, l_0 – средняя длина витка обмотки, n_k – число катушек в аппарате, k_r – коэффициент увеличения сопротивления, принимающий значение из отрезка [1,05; 1,3].

Для проверки гипотезы, выдвинутой в уравнении (2.172), была проведена серия опытов с устройствами различной мощности. Анализ результатов позволил рассчитать π_{58} . разница для устройств разной мощности составляла несколько процентов, т. е. фактически $\pi_{58} = \text{const} = 1,05$. Критерий π_{59} является эмпирическим значением

$$\pi_{59} = \frac{F_0}{F} \alpha_0, \quad (2.179)$$

числовое значение, которого получено в процессе сравнения результатов испытания аппаратов с теоретическими данными.

Подобие процесса теплоотдачи устанавливается критерием:

$$\pi_{60} = \frac{(r_0 i^2 + P_c)}{(\Theta - T_{\text{охл}})(\alpha_0 F - \chi r_0 i^2)}. \quad (2.180)$$

Критерий, устанавливающий условия на границах системы и кавитирующей жидкости. При работе акусто-магнитного аппарата в жидкости, находящейся в его рабочей зоне возникает кавитационная область. Кавитация образуется как на границе раздела фаз, так и в самой жидкости, принимая, иногда вид кавитационных тяжей. Пример такого скопления приведён на рис. 2.13 [42].

Причины образования скоплений такой формы пока не ясны, но все экспериментаторы, наблюдавшие тяжи, знают, что их конфигурация существенно меняется при незначительном изменении частоты. Отсюда, можно предположить, что тяжи связаны с интерференционной структурой ближнего поля излучателя, единственным фактором, сильно реагирующим на небольшое отклонение частоты. Таким образом, распределение кавитационных пузырьков в области в большинстве случаев далеко от равномерного.



Рисунок 2.13 – Кавитационные тяжи в поле кольцевого ферритового излучателя

Однако, есть условия, при которых распределение кавитационных пузырьков в области можно считать практически равномерным: это кавитационная область, образующаяся вблизи фокуса сферического фокусирующего концентратора. Здесь, следовательно, вполне правомерно рассматривать процессы в среднем. Единичный кавитационный пузырек или кавитационную область, представляющую собой их совокупность, можно рассматривать как своеобразный трансформатор мощности, в котором относительно медленно накапливаемая энергия высвобождается в течение весьма короткого времени, в результате чего мгновенная мощность во много раз превосходит среднюю, вводимую излучателем в кавитационную область.

Кавитирующая жидкость является нелинейной средой, в которой невозможно рассчитать мгновенное звуковое давление, поскольку отсутствует описание процесса пульсации всех пузырьков в области кавитации.

Введем понятие среднего сопротивления излучателя $R_{и}$ и представим эффективное звуковое давление $p_{э}$ как реакцию нелинейной среды на линейное колебание излучателя [2]:

$$p_{э} = \frac{v_m R_{и}}{2S}. \quad (2.181)$$

Тогда для плоской волны $\frac{R_{и}}{S} = \rho_k c_k$, где ρ_k и c_k – плотность и скорость

звука эквивалентной среды, а выражение (2.177) представим в виде:

$$p_э = \frac{v_m \rho_k c_k}{2}. \quad (2.182)$$

Без учета нелинейности пульсации полостей эквивалентные характеристики имеют вид:

$$\rho_k = \rho(1 - \bar{K}) + \rho_{\text{пг}} \bar{K}; \quad \beta_k = \beta_0(1 - \bar{K}) + \beta_{\text{пг}} \bar{K}, \quad (2.183)$$

где β_0 – сжимаемость жидкости; $\rho_{\text{пг}}$ и $\beta_{\text{пг}}$ – плотность и сжимаемость парогазовой смеси в полости; $\bar{K} \approx 0.1K$ – средний за период индекс кавитации, поскольку средний радиус пузырька $\bar{R} = \frac{1}{2} R_{\text{max}}$.

Для воды, учитывая, что $\rho_{\text{пг}} \ll \rho_0$, $\beta_{\text{пг}}/\beta_0 \approx 10^4$, $\bar{K} \ll 1$, выражение имеет вид:

$$\overline{\rho_k c_k} = \rho_0 \rho_0 \left[\frac{\beta_0}{K \beta_{\text{пг}}} \right]^{1/2}. \quad (2.184)$$

Резкое падение волнового сопротивления среды наблюдается практически с начала образования кавитации. При индексе кавитации $K=0,001$ волновое сопротивление уменьшается на тридцать процентов [2].

Установим критерий подобия процессу реакции нелинейной среды на линейное колебание излучателя:

$$\pi_{61} = \frac{v_m \rho_k c_k}{2 p_э}. \quad (2.185)$$

Обобщенные критерии геометрических параметров разных типов и конструкций акусто-магнитного аппарата. Магнитопровод в виде ферритового кольца акусто-магнитного аппарата плотностью характеризуется тремя линейными размерами: $a = D_{\text{нар}} - D_{\text{вн}}$, b , $c = d$. размеры представлены на рисунке 2.14. Примем размер a за базисный.

Система относительных единиц позволяет определить все геометрические параметры в зависимости от этого базового размера, постоянных коэффициентов $k_з$ и $k_{ок}$ и двух безразмерных параметров: $\pi_{62} = \frac{c}{a}$, $\pi_{63} = \frac{b}{a}$, где π_{62} – отношение внутреннего диаметра к базисному размеру; π_{63} – отношение ширины кольца к базисному размеру.

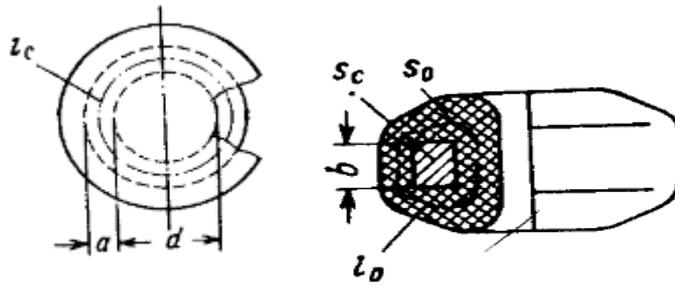


Рисунок 2.14 – Основные размеры магнитострикционного аппарата

Геометрические параметры акусто-магнитного аппарата в общем виде:

$$S_c = \pi_{63} a^2, \quad S_0 = \frac{\pi}{4} (2 - \pi_{64}) \pi_{64} \pi_{62}^2 a^2, \quad (2.186)$$

$$l_0 = \left(\frac{\pi}{8} \left[\frac{(\pi_{62} + 1)(2 - \pi_{64}) \pi_{64} \pi_{62}^2}{\pi_{29}(\pi_{29} + 2)} + \sqrt{(\pi_{62} + 2)^2 + (2 - \pi_{64}) \pi_{64} \pi_{62}^2} + (\pi_{64} + 1) \cdot \right. \right. \\ \left. \left. \pi_{62} - (\pi_{62} + 2) \right] + 2 \sqrt{\frac{(2 - \pi_{64}) \pi_{64} \pi_{62}^2}{4 \pi_{62}(\pi_{62} + 2)} + 1 + 2 \pi_{63}} \right) a. \quad (2.187)$$

Для акусто-магнитного аппарата критерий заполнения окна обмоткой π_{64} находится из выражения:

$$\pi_{64} = \frac{\pi_{62} - \frac{d_0}{a}}{\pi_{62}}. \quad (2.188)$$

Чтобы найти размер аппарата, необходимо сначала определить константы $\pi_{62} \pi_{63} \pi_{64} \pi_{65}$, а затем вычислить значение его основного размера a , учитывая π_{65} , т.е. отношение потерь в сердечнике к потерям в обмотке:

$$\pi_{65} = \frac{P_c}{r_0 i^2}. \quad (2.189)$$

Критериальное уравнение геометрических параметров разных типов и конструкций акусто-магнитных аппаратов имеет вид:

$$\pi_{66} = f_{14}(\pi_{62}, \pi_{63}, \pi_{64}, \pi_{65}). \quad (2.190)$$

Критерии подобия электромагнитных полей, создаваемых периодическими переменными токами, отвечающие (2.16), имеют вид:

$$\pi_{67} = \pi'_{11эм} = \mu \varepsilon L_{акз}^2 \omega^2, \quad (2.191)$$

Уравнение, связывающее результирующий признак (противонакипный эффект, водородный показатель и т.п.) с протекающими процессами в акусто-магнитном поле, имеет вид:

$$\xi_{\text{рп}} = f_{15}(\pi_{51}, \pi_{54}, \pi_{57}, \pi_{60}, \pi_{61}, \pi_{66}, \pi_{67}), \quad (2.192)$$

где $\xi_{\text{рп}}$ – коэффициент противонакипного эффекта.

Эти зависимости носят частный характер и справедливы только для тех условий, при которых проводились опыты. Однако, эти частные результаты можно применить для расчета количества образованной накипи в иных случаях. В частности, меняя частоту, количество витков провода и вид намотки провода, можно подобрать такое значение $\xi_{\text{рп}}$, при котором эффект будет максимальным для данного размера аппарата.

$$\xi_{\text{рп}} = \left\{ \begin{array}{l} \pi_{54} = \frac{U_{\text{акт}}}{U_{\text{р}}} \\ \pi_{57} = \frac{v\tilde{F}}{U_i}; \\ \pi_{60} = \frac{(r_0 i^2 + P_c)}{(\Theta - T_{\text{охл}})(\alpha_0 F - \chi r_0 i^2)}; \\ \pi_{61} = \frac{v_m \rho_k c_k}{2p_3}; \\ \pi_{67} = \mu \varepsilon L_{\text{акз}}^2 \omega^2; \quad \pi_{66} = \begin{cases} \pi_{62} = \frac{c}{a}; \\ \pi_{63} = \frac{b}{a}; \\ \pi_{64} = \frac{\pi_{62} - \frac{d_0}{a}}{\pi_{62}}; \\ \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_5}; \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_1} \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 (2.193)$$

Полученную систему уравнений затруднительно решить аналитически, однако, существуют методы теории подобия для анализа результатов экспериментальной отработки эксплуатации сложных изделий, заключающиеся в обобщении совокупного опыта отработки аналогов в виде критериальных комплексов параметров. Комплексы параметров используются для установления базовых требований к условиям и результатам испытаний и оценке завершенности отработки путем сравнения базовых и фактически достигнутых уровней параметров и показателей надежности.

Одним из эффективных методов, который позволяет учесть особенности оценки критериев стохастического подобия и выработать единый подход для получения критериальных комплексов в условиях малого объема испытаний при большом числе учитываемых факторов, является метод группового учета аргументов [160].

Данный метод может быть использован для построения и оценки критериев стохастического подобия сложных процессов, изучаемых при экспериментальной отработке и испытаниях технических изделий. Полученные критерии целесообразно применять при выборе аналога создаваемого изделия, планирования испытаний и оценке завершенности экспериментальной отработки на основе сравнения изделий и процессов их испытаний по критериям подобия.

Выбор управляемых параметров и оценка критериев подобия. Если известны уравнения, описывающие процессы в рассматриваемой системе, то критерии подобия могут быть получены из этих уравнений. Следует либо записать уравнения в относительных единицах, либо воспользоваться преобразованием индикаторов подобия. Оба способа совершенно равноправны, но первый в некоторых случаях позволяет более наглядно раскрыть физический смысл критериев подобия, их внутреннее содержание. В тех случаях, когда уравнение процессов, происходящих в системе, заранее неизвестно, критерии подобия могут быть установлены из анализа размерностей на основании π -теоремы. При этом следует исходить из качественного описания процесса, указывающего, какие величины участвуют в процессе, влияют на характер его протекания и его исход. Есте-

ственно, что чем полней и достоверней знание величин, существенных для процесса, тем меньше вероятность ошибки, тем меньше вероятность того, что какая-либо величина не будет учтена. Если хотя бы одна из величин, оказывающих существенное влияние на процесс, не будет учтена, то это приведет к неправильной оценке других, т.е. метод анализа размерностей не всегда дает уверенность в правильности получаемых с его помощью результатов. Тем не менее, этот метод может быть очень плодотворным, особенно в тех случаях, когда прямой математический анализ трудно осуществим.

Величины, входящие в выражения критериев подобия, могут изменяться от точки к точке, а также во времени. Если критерии используются как безразмерные постоянные комплексы, то входящие в них величины являются постоянными. Эти постоянные будем называть базисными величинами. В качестве таковых целесообразно брать наиболее характерные значения соответствующих величин, например, сопротивление проводника при рабочей температуре; значение рабочего зазора, в котором происходит обработка жидкости; ток, установившийся в конце процесса; температуру, допустимую для данного класса изоляции и существующих условий работы и т.п.

Оценка коэффициентов регрессии. Коэффициенты уравнений регрессии могут быть оценены в соответствии с ПРЕСС– процедурой, предложенной в работе Аллена[165].

2.3 Выводы

На основании проведенных теоретических исследований можно сделать следующие выводы.

1. Анализ подобия основных физических процессов, протекающих в акустомагнитном аппарате, позволил разработать метод подобия, который базируется на условиях подобия электромагнитных полей в однородной изотропной, в неоднородной и анизотропной средах; для электродинамиче-

- ских процессов; тепловых процессов; неустановившегося движения несжимаемой проходящей жидкости; геометрических размеров установок.
2. На основе второй и третьей теоремы подобия установлены количество и состав критериев, необходимых для описания процессов, происходящих в акусто-магнитном аппарате. В условия однозначности включены геометрические параметры исследуемой системы, физические параметры среды, начальные условия по напряженностям электрического и магнитного полей, а также краевые условия на границах.
 3. В исследованиях приняты следующие положения: геометрическое подобие характеризуется равенством масштабов геометрических параметров по трем осям координат; критерии подобия электромагнитных полей, создаваемые периодическими переменными токами, дополнены критерием гомохронности; все критерии электродинамического подобия остаются справедливыми при нелинейных или переменных параметрах, если соблюдено условие идентичности относительных характеристик этих параметров; общим условием подобия тепловых процессов является соблюдение критериев Фруда, Пекле, Нуссельта, Прандтля.
 4. Предложенный метод определения критериев подобия остается справедливым при нелинейности параметров моделируемых систем. Установление связи между числами подобия позволят проектировать и изготавливать акусто-магнитное оборудование различного типоразмера.
 5. На основе схемы замещения электромагнитной составляющей акусто-магнитного аппарата и в результате решения задачи подобия электрических цепей получены критериальные уравнения для различных моментов времени, решение которых позволяет получить необходимые критерии подобия для состояния цепи, содержащей взаимные индуктивности.
 6. На основе общей теории электро-акустических преобразователей и полной системы уравнений магнитострикционного преобразователя получены критерии, связывающие физические параметры внешней среды и выходные параметры акусто-магнитного аппарата.

7. Получены критерии, учитывающие в аппарате процессы теплоотдачи, теплообмена и связывающие температуру окружающей среды с тепловым режимом работы оборудования.
8. Подобие процесса реакции нелинейной среды на линейное колебание излучателя позволило получить критерий подобия, учитывающий процессы кавитации жидкости в области аппарата.
9. Система относительных единиц позволяет получить обобщенные критерии геометрических параметров для разных типов и конструкций акусто-магнитных аппаратов.
10. Выведено уравнение или в общем виде сформировано уравнение, связывающее количество образованной накипи с протекающими процессами в акусто-магнитном поле через критерии подобия $\xi_{рпв} = f(\pi_{ij})$. Данную функциональную связь можно применять для расчета количества образованной накипи в различных случаях. Так меняя частоту, количество витков провода и вид намотки провода, можно подобрать такое значение $\xi_{рпв}$, при котором эффект уменьшения количества накипи будет максимальным для данного размера аппарата.
11. Разработана математическая модель основных физических процессов, протекающих в акусто-магнитном аппарате, для установления влияния её параметров на процесс солеотложения. Аналитическое решение по полученной математической модели в виде системы уравнений затруднительно, но можно использовать обобщение совокупного опыта отработки аналогов в виде критериальных комплексов параметров. Установлена последовательность выбора управляемых параметров совместно с оценкой критериев подобия.

3 СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УСТРОЙСТВЕ

3.1 Разработка новых способов обработки жидкостей с получением структурных и функциональных схем акусто-магнитной электротехнологии

Из научно-технической литературы известно, что основные проблемы, возникающие при эксплуатации водопроводных систем, – это накипеобразование, коррозия и микробиологическое обрастания. Поэтому стабильность воды при использовании ее в качестве теплоносителя – один из основных показателей эффективности эксплуатации водопроводных систем. Нарушение стабильности воды может быть вызвано наличием растворенной угольной кислоты, сероводорода или кислорода, перенасыщенностью воды карбонатом кальция или гидроксидом магния, повышенной концентрацией сульфатов и (или) хлоридов [25].

Существенным недостатком известных способов является сложность процесса и относительно низкая стабильность воды. Предлагаемое техническое решение работоспособно и его использование возможно в водяных системах производственных потребителей агропромышленного комплекса. Безреагентную обработку воды осуществляют следующим образом. В качестве комбинированного физического воздействия на поток воды используют ультразвуковые акустические колебания и вращающиеся противоположно направленные электромагнитные поля. При подаче трёхфазного переменного напряжения на обмотки ферритовых колец создаётся вращающееся электромагнитное поле с противоположным направлением вращения в каждом из ферритовых колец, концентрирующееся в кольцевом зазоре между электромагнитной системой и пластинами магнито-стрикционного излучателя, где протекает вода. На графических материалах для большей ясности представлены только те детали, которые необходимы для понимания сущности устройства, а сопутствующие элементы, хорошо известные специалистам в данной области, не детализируются.

Определенная конфигурация катушек позволяет устройству в максималь-

ной мере использовать электромагнитную энергию обмотки, создающей вращающиеся магнитное и акустическое поля. Частота электрического тока подбирается так, чтобы возникал резонансный эффект, который заставляет сжиматься и разжиматься ферритовый сердечник, воспроизводя тем самым, звуковые колебания в самом устройстве и колебания, воздействующие на жидкость. В результате одновременно с ультразвуковыми колебаниями и переменным вращающимся магнитным полем на поток воды воздействуют акустические колебания, излучаемые внутренней и внешней поверхностями ферритовых колец, что способствует более глубокому (по сравнению с известными устройствами) изменению физических свойств воды, влияющее на повышение стабильности воды. На рисунке 3.1 представлена функциональная схема устройства обработки жидкости.

Устройство для защиты от образования отложений на поверхностях трубопроводов систем теплоснабжения включает циркуляционный насос 1, котел 2, трубопровод 3 подачи воды, обратный трубопровод 4 тепловой сети, гидравлически сообщенные между собой (на рис.3.1 обозначен пунктирной линией), блок обработки жидкости 5 и генераторный блок 6, электрически и независимо соединенный с циркуляционным насосом 1, блоком обработки жидкости 5, котлом 2. В качестве генераторного блока 6 использован источник переменного трехфазного напряжения, создающий переменное напряжение в резонансном звуковом диапазоне частот ферритового кольца, а на соединительном трубопроводе, выполненном из диамагнитного материала, между котлом 2 и циркуляционным насосом 1 установлен блок обработки жидкости 5.

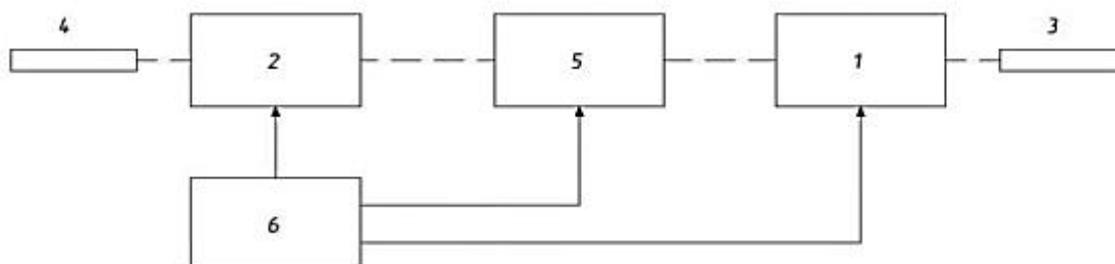


Рисунок 3.1 – Функциональная схема устройства обработки жидкости

На рисунке 3.2 изображен в разрезе общий вид блока обработки жидкости устройства для защиты от образования отложений на поверхностях трубопроводов систем теплоснабжения.

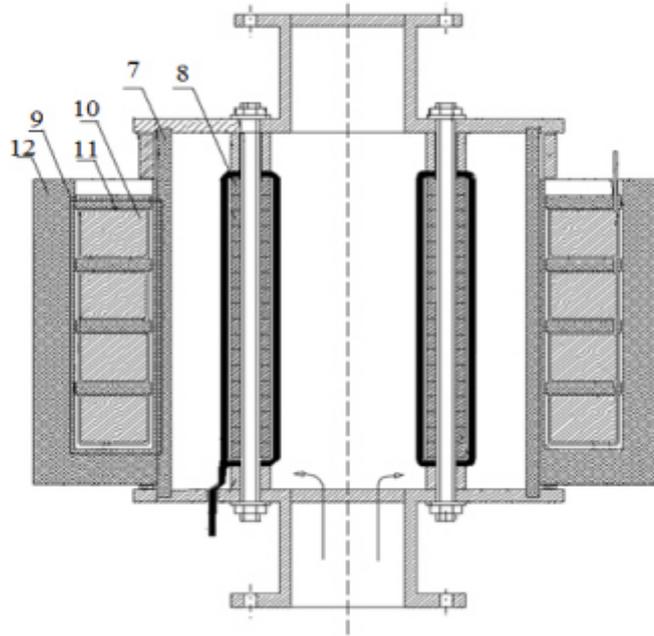


Рисунок 3.2 – Общий вид блока обработки жидкости (в разрезе) устройства для защиты от образования отложений на поверхностях трубопроводов систем теплоснабжения теплиц

Блок обработки жидкости выполнен в виде цилиндрического немагнитного корпуса 7, имеющего внутри магнитоотрицательный источник 8 ультразвуковых колебаний, а снаружи – электромагнитную систему 9, состоящую из магнитопровода 10, обмоток 11 и выводов для подключения к генераторному блоку (рисунок 3.1). Электромагнитная система 9 установлена в дополнительном из диаманитного материала корпусе 12 с осевым сквозным отверстием 13. Корпус 12 имеет проточку для электромагнитной системы 9 и разъем для подключения выводов катушки к генераторному блоку. В электромагнитной системе 9 магнитопровод 10 выполнен в виде нескольких ферритовых колец. Корпус 7 с электромагнитной системой 9 заполнен компаундом, например, эпоксидной смолой [88].

На рисунке 3.3 представлена электрическая схема соединения обмоток и катушек электромагнитной системы [88].

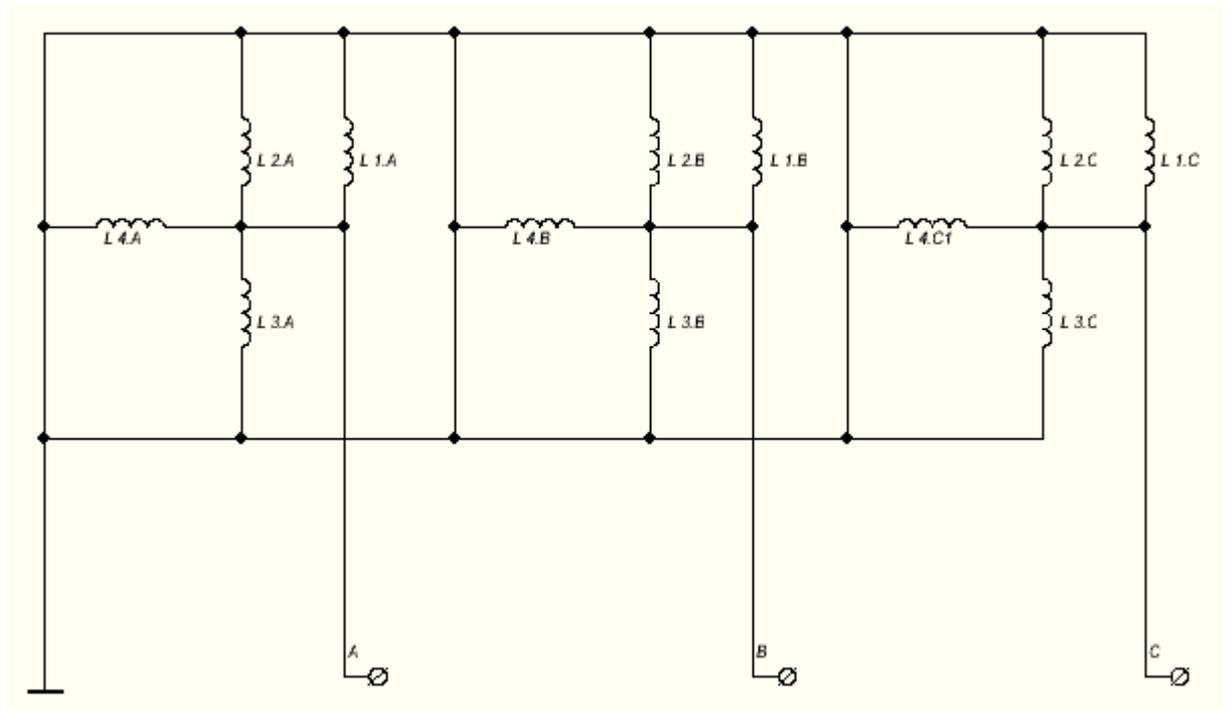


Рисунок 3.3 – Электрическая схема соединения обмоток и катушек электромагнитной системы

Обмотки (L 1), (L 2), (L 3), (L 4) расположены друг от друга на расстоянии, не допускающем перекрытия вращающихся магнитных полей, причем каждая обмотка состоит из трех катушек с выводами, подключенными по схеме «звезда», а сами катушки соединены параллельно и подключены к генераторному блоку переменного трехфазного напряжения. Определенная конфигурация катушек позволяет устройству в максимальной мере использовать электромагнитную энергию обмотки, создающей вращающиеся магнитное и акустическое поля. Частота электрического тока подбирается так, чтобы возникал резонансный эффект, который заставляет сжиматься и разжиматься ферритовый сердечник, воспроизводя тем самым, звуковые колебания в самом устройстве и колебания, воздействующие на жидкость. В результате одновременно с переменным вращающимся магнитным полем на поток воды воздействуют акустические колебания, излучаемые внутренней и внешней поверхностями ферритовых колец, что способствует более глубокому (по сравнению с известными устройствами) изменению молекулярных свойств воды, влияющие на повышение стабильности воды.

Повышение эксплуатационных характеристик происходит вследствие уменьшения нагрева блока обработки жидкости 5 из-за отсутствия токов Фуко, и уменьшения тока, потребляемого электромагнитной системой 9, за счет магнитопровода 10, выполненного из ферритовых колец с обмотками 11, потребляющими ток малой мощности вследствие перехода на трехфазный источник напряжения (14 В) высокой частоты [88].

Исследование процесса обработки воды проводилось на экспериментальном стенде. В качестве опытного теплообменника применялся заключенный в кожух трубчатый электронагреватель. Для обеспечения постоянства температуры воды, её пропускали через охладитель (тип охладителя «труба в трубе»), а расход регулировали трехходовым краном. До и после опытного теплообменника на трубопроводах были установлены термометры для контроля температуры [88].

Исследования были проведены на воде с общим солесодержанием 1098 мг/л, общей жесткостью воды 5,2мг-экв/л, карбонатной жесткостью 2,2мг-экв/л. Исследования проводились циклично, продолжительность каждого цикла составляла 48ч. Количество накипи, образовавшейся на поверхности нагрева электронагревателя, определяли объемным способом [79].

Эффективность безреагентной обработки воды определялась из соотношения:

$$\xi_{\text{рпв}} = \frac{M_0 - M_m}{M_0}, \quad (3.1)$$

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

Усвоение растениями основных веществ: фосфора, азота, калия, магния, зависит от уровня рН. Существенной проблемой гидропоники является изменение значения рН питательного раствора. Эту проблему решают путем замены раствора каждые две недели. Существенным недостатком известных способов обработки гидропонного питательного раствора является усложнение процесса с технологической точки зрения посредством промывки субстратов водой и барботирования воз-

духа.

Новизна заявляемого способа обработки гидропонного питательного раствора состоит в комбинированном воздействии акустическим и вращающимся электромагнитным полями излучаемых акусто-магнитным устройством. Способ обработки гидропонного питательного раствора применим на сельскохозяйственных предприятиях, в растениеводческих хозяйствах, а также в специализированных теплицах, что соответствует критерию «промышленная применимость».

Обработка гидропонного питательного раствора осуществляется с помощью устройства, состоящего из смесительной емкости для размещения питательного раствора с входными трубопроводами и выходным трубопроводом с узлом обработки питательного раствора, который выполнен в виде корпуса с осевым сквозным отверстием из диамагнитного материала с электромагнитной системой. Она состоит из магнитопровода, выполненного в виде нескольких ферритовых колец, установленных друг от друга на расстоянии, обеспечивающем исключение перекрытия вращающихся магнитных полей. На каждом из ферритовых колец расположены три обмотки с выводами, соединенными по схеме «звезда», обмотки всех колец между собой соединены параллельно и подключены к источнику питания, в качестве которого использован источник переменного трехфазного напряжения, создающий переменное напряжение в резонансном ультразвуковом диапазоне частот $[32 \div 35]$ кГц.

Предложенная конфигурация обмоток позволяет устройству в максимальной мере использовать электромагнитную энергию катушки, создающей вращающееся электромагнитное поле. Частота электрического тока подбирается так, чтобы возник резонанс колебаний, при котором наблюдаются максимальные радиальные магнитострикционные колебания ферритового кольца, создавая тем самым, ультразвуковые колебания в рабочей зоне устройства. В результате одновременно с переменным вращающимся электромагнитным полем на поток питательного раствора воздействуют акустические колебания, излучаемые внутренней и внешней поверхностями ферритовых колец, что способствует более глубокому (по сравнению с известными устройствами) изменению свойств раствора,

стабилизации оптимального диапазона значений рН питательного раствора. [76]

Технические параметры устройства: размеры ферритового кольца, длина рабочего зазора, число витков и диаметр провода обмоток подбираются в зависимости от количества обрабатываемого раствора за единицу времени.

На рисунке 3.4 показана структурная схема узла для обработки питательного раствора.

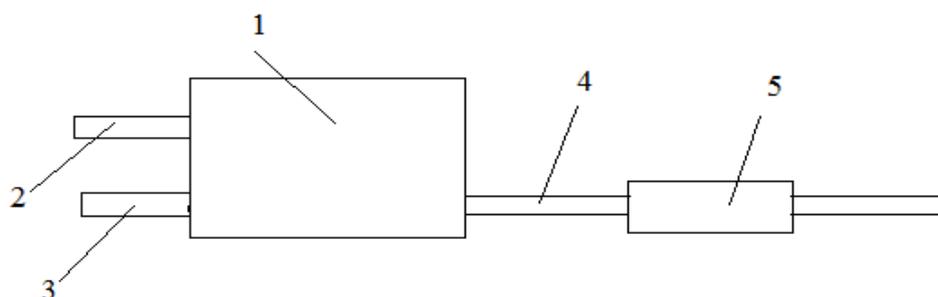


Рисунок 3.4 – Структурная схема узла для обработки питательного раствора

Устройство для подготовки питательного раствора для гидропонного выращивания растений работает следующим образом. В смесительную емкость (1) насыпают сухое вещество или смесь веществ, входящих в состав питательного раствора и по входным трубопроводам (2,3) подают воду, размешивают, получившийся раствор по трубопроводу (4) поступает через узел обработки (5), где подвергается комбинированному воздействию акустического и вращающихся магнитных полей, к растениям [92].

Общий вид устройства для подготовки питательного раствора при гидропонном выращивании растений изображен на рисунке 2.8, а на рисунке 2.9 представлено поперечное сечение аппарата. Два цилиндрических корпуса (6) с проточками (9) и (10), расположенными на трубопроводе (4), металлические гайки (8) с резьбой, фиксирующие цилиндрические корпуса на трубопроводе и крепятся к трубопроводу винтами (9), прижимные диэлектрические шайбы (10) и (11), размещенные внутри корпусов четырех ферритовых преобразователей (12), установленных друг от друга на расстоянии, обеспечивающем исключение перекрытия вращающихся магнитных полей.

На каждом из ферритовых преобразователей расположены три обмотки (13)

с выводами (14), соединенными по схеме «звезда», обмотки соединены между собой параллельно и подключены к источнику переменного трехфазного напряжения, создающего переменное напряжение в резонансном ультразвуковом диапазоне частот $32 \div 35$ кГц.

При подаче от внешнего генератора трехфазного импульсного напряжения, на трехфазную обмотку ферритового преобразователя, под воздействием возникающего переменного электрического тока, создается вращающееся магнитное поле в ферромагнитном тороидальном сердечнике.

Переменное магнитное поле в ферритовом кольце вызывает его радиальные механические колебания вследствие магнитострикционного эффекта. Частота колебаний сердечника должна быть резонансной для применяемого ферритового кольца. Ультразвуковые механические колебания излучающей поверхности феррита формируют звуковую волну, проходящую через эпоксидную смолу и материал жидкостного трубопровода в рабочую зону аппарата, и совместно с переменным магнитным полем физически воздействует на протекающую воду [92].

Для подтверждения эффективности заявляемого технического решения были проведены опыты. Питание устройства осуществлялось от источника переменного тока напряжением 14 В, подаваемым на ферритовое кольцо с обмоткой. Сила потребляемого тока составляла 200 мА. Раствор подавался через трубку, проходящую через сквозное отверстие устройства, где подвергался комбинированному воздействию ультразвукового и магнитного полей [92]. В качестве объекта исследования использовался питательный раствор, представляющий смесь веществ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$; K_2SO_4 ; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$; MgSO_4 с заданной концентрацией и значением рН. Раствор брали из бака лабораторной установки посредством насоса, пропускали через рабочую область устройства и снова сливали в бак, из которого бралась проба для измерения значения рН. Значение рН измерялось при $t = 18^\circ\text{C}$ с помощью электронного KL 009(1)А рН-метра. Полученные результаты влияния акусто-магнитной обработки на значение рН гидропонного раствора приведены в таблице Е.2 приложения Е. Как видно из таблицы Е.2, значение рН гидропонного раствора возрастает от 6 до 6,9 ($\Delta\text{pH}=0,9$)

[92].

Таким образом, безреагентный способ обработки питательных растворов гидропонных установок с помощью заявляемого устройства позволяет малыми энергетическими затратами добиться оптимального роста растений посредством регулирования значения рН питательного раствора.

3.2 Выбор акустических параметров при проектировании ультразвуковой части аппарата

Расчет акусто-магнитного аппарата начинается с выбора акустических параметров ультразвуковой части аппарата. После этого проводится расчет электромагнитной составляющей аппарата, затем устанавливаются критерии подобия.

Основным элементом ультразвуковой подсистемы акусто-магнитного аппарата является магнитострикционный сердечник. Рассмотрим сердечники из ферритовых материалов. Ферритовым материалам для сердечников присуще свойство магнитострикции [163]. Однако, химический состав ферритов, используемый для обычных сердечников, был разработан с целью получения большой магнитной проницаемости, и поэтому они не пригодны для магнитострикционных вибраторов. Более того их механическая прочность в режиме колебаний обычно невелика [68]. Ученые группы под руководством Е.Кикучи выполнили широкую программу исследований и разработали несколько различных типов ферритов, обладающих одновременно большим коэффициентом электромеханической связи и высокой механической прочностью. Были исследованы Ni-Cu-, Ni-Cu-Co-, Ni-Cu-Co-Mn-, Ni-V-, Ni-Cu-V-, Ni-Cu-V-Co, Ni-Cu-W-, Ni-Cr-, Ni-Cu-Zn-, Ni-Cu-Cd-, Ni-Cu-Zn-Cd-, Ni-Li-, Ni-Cu-Li-, Ni-Cu-Li-Co-, Ni-Li-V-ферриты; одновременно изучалось поведение этих ферритов при введении небольших количеств таких добавочных компонентов, как MgO, SiO₂, MnO, Na₂O, K₂O, Al₂O₃, TiO₂, As₂O₃, CaO, BaO, SrO, PbO и им подобных, которые могут влиять на магнитострикционные и механические характеристики ферритов. Многие из этих ферритов были запатен-

тованы в нескольких странах [106]. После проведения основных исследований промышленные разработки были сосредоточены на Ni-Cu- [22] и Ni-Cu-Co-ферритах [164].

Разработанные таким образом магнитострикционные ферриты получили название «виброкс». После многих трудоемких производственных экспериментов была создана их производственная технология, и ферриты марок виброкс-1 и виброкс-2 начали изготавливаться в Японии серийно [179].

Одновременно научные исследования проводились фирмой «Филипс» в Нидерландах, и были опубликованы [179] магнитострикционные динамические характеристики разработанных ферритов, получивших коммерческое название «ферроксуб» и предназначенных для магнитных сердечников. Публикация включала результаты исследований ферритов с добавками Co. Сообщались также некоторые данные [132] о связи между пористостью образцов и их механической прочностью при колебаниях.

Показатель чувствительности материала излучателя представляет собой отношение амплитуды колебаний к напряжению на входе преобразователя. Чувствительность по напряжению в режиме холостого хода:

$$\nu_U = \xi^m / U_m. \quad (3.2)$$

Собственное сопротивление преобразователя на резонансной частоте равно, как правило, сопротивлению механических потерь. Данный параметр можно определить при измерении добротности контуров нагруженного и ненагруженного преобразователя. Уменьшение амплитуды связано с добротностью нагруженного преобразователя $Q_{\text{прн}}$, которая, в свою очередь, зависит от добротности ненагруженного преобразователя Q_0 , соотношения сопротивления механических потерь преобразователя и сопротивления нагрузки при малой реактивной составляющей нагрузки [63]:

$$Q_{\text{прн}} = Q_0 \frac{R_{\text{м.п}}}{R_{\text{м.п}} + R}, \quad (3.3)$$

где $R_{\text{м.п}}$ – сопротивление механических потерь.

Электро-акустический коэффициент полезного действия используется для оценки эффективности преобразователя с энергетической точки зрения. Для ряда технологических процессов, основным технологическим параметром является полная акустическая мощность. Еще одной важной характеристикой является чувствительность по току:

$$\zeta = \frac{\xi_m}{I_m \sqrt{R}}. \quad (3.4)$$

Основными характеристиками преобразователя: чувствительность, сопротивление механических потерь, коэффициент эффективности, допустимая амплитуда, номинальная электрическая мощность, электромеханический КПД, добротность ненагруженного преобразователя, ток подмагничивания, входное сопротивление [63].

Известно, что результативность ультразвуковой обработки возрастает с уменьшением частоты, а производительность обработки при неизменной амплитуде смещения повышается с увеличением частоты. При увеличении частоты уменьшаются габаритные размеры и масса, но падает амплитуда колебаний и КПД системы. Обстоятельства работы при излучении в среду характеризуются заданной площадью излучения и удельной акустической мощностью.

Выявлено, что добротность для всех магнитострикционных материалов, зависит от напряженности постоянного поля. При этом для ферритов и никеля добротность зависит от амплитуды ультразвуковых деформаций [132].

В этом случае предельную деформацию в заданном объеме возможно получить в радиальной колебательной системе. распределение амплитуды радиальных колебаний и деформаций такое, что в центре наблюдается максимум амплитуды деформаций, амплитуда смещений практически уменьшается до нуля; на внешней стороне колебательной системы амплитуда смещений доходит до максимума. Основные характеристики такого преобразователя: резонансная частота; амплитуда ультразвуковых деформаций. Имеется однозначное соответствие между амплитудой колебаний на наружной поверхности ξ_R и амплитудой ультразвуковых деформаций $\varepsilon_{mr}(r)$ в центре при $r = 0$:

$$\varepsilon_{mr}(0) = \gamma k_{вч} \xi_R, \quad (3.5)$$

где $k_{вч}$ – волновое число; γ – коэффициент, зависящий только от формы преобразователя. Коэффициент γ аналогичен коэффициенту усиления стержневого концентратора.

3.3 Выбор электрических и магнитных параметров при проектировании электромагнитной части аппарата

Известно, что с трансформацией габаритов акусто-магнитных аппаратов изменение индукции, температуры обмотки, плотности тока происходит не пропорционально. Выбор электрических и магнитных параметров необходимо начинать с подбора материала излучателя, далее нужно определить частоту колебаний излучателя. Для ферритовых излучателей рабочая частота может быть рассчитана по формуле [68]:

$$f_{рч} = \frac{v_{фер}}{2\pi R_{ср}}, \quad (3.6)$$

где $R_{ср} = \frac{R_{нар} + R_{в}}{2}$ – средний радиус кольца, $R_{в}$ – внутренний радиус кольца, $v_{фер}$ – скорость распространения упругих колебаний в феррите, $f_{рч}$ – выбранная частота.

Основные геометрические параметры определяются из конструкции излучателя (рис.3.5). Значение радиуса может не удовлетворять производственным требованиям по диаметру трубы, тогда рассматриваем ближайшее подходящее значение из возможных вариантов.

Оптимальная величина среднего диаметра кольца вычисляется по формуле:

$$D_{ср} = \frac{v_{фер}}{\pi f_{рч}}. \quad (3.7)$$

Активную ширину кольца излучателя определяют по среднему диаметру. Экспериментально установлено, что оптимальная ширина активной части кольца лежит в пределах 15 – 20% величины среднего диаметра кольца излучателя $D_{ср}$:

$$a = (0.15 \div 0.2)D_{\text{ср}} . \quad (3.8)$$

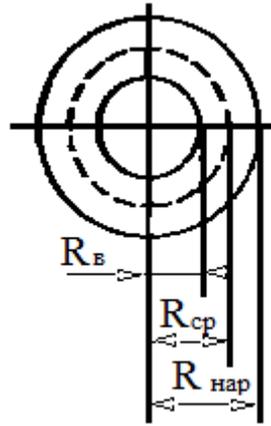


Рисунок 3.5 – Вид конструкции цилиндрического излучателя

Определяют наружный и внутренний диаметры колец излучателя:

$$D_{\text{вн}} = D_{\text{ср}} - \frac{a}{2} , \quad (3.9)$$

$$D_{\text{н}} = D_{\text{ср}} + \frac{a}{2} . \quad (3.10)$$

Площадь поперечного сечения S_c ферритового кольца:

$$S_c = (R_{\text{нар}} - R_{\text{в}}) \cdot h . \quad (3.11)$$

Сердечник акусто-магнитного аппарата полностью характеризуется тремя линейными размерами: $a = R_{\text{нар}} - R_{\text{в}}$; b ; $c = D_{\text{вн}} = d$.

Обобщенные геометрические параметры аппарата имеют вид [19]:

$$S_0 = \frac{\pi}{4} \left(2 - \frac{\frac{c}{a} \frac{d_0}{a}}{\frac{c}{a}} \right) \frac{\frac{c}{a} \frac{d_0}{a}}{\frac{c}{a}} \cdot \left(\frac{c}{a} \right)^2 \cdot a^2 , \quad (3.12)$$

$$l_0 = \left(\frac{\pi}{8} \left[\frac{\left(\frac{c}{a} + 1 \right) \left(2 - \frac{\frac{c}{a} \frac{d_0}{a}}{\frac{c}{a}} \right) \frac{\frac{c}{a} \frac{d_0}{a}}{\frac{c}{a}} \left(\frac{c}{a} \right)^2}{\frac{c}{a} \left(\frac{c}{a} + 2 \right)} + \sqrt{\left(\frac{c}{a} + 2 \right)^2 + \left(2 - \frac{\frac{c}{a} \frac{d_0}{a}}{\frac{c}{a}} \right) \frac{\frac{c}{a} \frac{d_0}{a}}{\frac{c}{a}} \left(\frac{c}{a} \right)^2} + \left(\frac{\frac{c}{a} \frac{d_0}{a}}{\frac{c}{a}} + \right. \right. \\ \left. \left. + 1 \right) \frac{c}{a} - \left(\frac{c}{a} + 2 \right) \right] + 2 \sqrt{\frac{\left(2 - \frac{\frac{c}{a} \frac{d_0}{a}}{\frac{c}{a}} \right) \frac{\frac{c}{a} \frac{d_0}{a}}{\frac{c}{a}} \left(\frac{c}{a} \right)^2}{4 \frac{c}{a} \left(\frac{c}{a} + 2 \right)} + 1 + 2 \frac{b}{a}} \right) a . \quad (3.13)$$

Число витков на вольт для магнитной части определяем по формуле:

$$n = \frac{33,3}{S_c}. \quad (3.14)$$

Находим расчетные числа витков первичной и вторичной обмоток для одной из фаз акусто-магнитного аппарата:

$$n_{\text{пер}} = n \cdot U_c, \quad (3.15)$$

$$n_{\text{втор}} = w \cdot U_H, \quad (3.16)$$

где U_c – напряжение, подаваемое на излучатель, U_H – напряжение, подаваемое на обмотку управления.

Ток, протекающий через аппарат, состоит из активной $i_{\text{акт}}$ и реактивной i_p составляющих. Поскольку токи $i_{\text{акт}}$ и i_p сдвинуты по фазе на 90° (в силу свойства индуктивности), можно записать выражение для действующего значения тока аппарата:

$$i = \sqrt{i_{\text{акт}}^2 + i_p^2}. \quad (3.17)$$

Формула для активной составляющей тока имеет вид:

$$i_{\text{акт}} = \frac{m_c P_o}{E_{\text{об}}}, \quad (3.18)$$

где $E_{\text{об}}$ – ЭДС всех обмоток аппарата, В; P_o – удельная мощность потерь в магнитопроводе, Вт/кг; m_c – масса ферритового кольца, из которого изготовлен магнитопровод, кг.

Масса магнитопровода вычисляется исходя из его объема:

$$m_c = \frac{\pi}{4} k_c \rho_c (D_{\text{нар}}^2 - D_{\text{вн}}^2) \cdot h_{\text{фк}}, \quad (3.19)$$

где ρ_c – плотность феррита,

$$k_c = \frac{h_{\text{фк}}}{h_{\text{покр}}}, \quad (3.20)$$

где $h_{\text{фк}}$ – толщина ферритового кольца; $h_{\text{покр}}$ – толщина ферритового кольца с учетом толщины покрытия.

Реактивная составляющая определяется по формуле [159]:

$$i_p = \frac{Hl}{n_{\text{перз}}}, \quad (3.21)$$

где H – напряженность магнитного поля в магнитопроводе аппарата; l –

длина средней магнитной линии магнитопровода; $n_{\text{перз}}$ – число витков первичной обмотки аппарата (для трёх фаз).

Определение сечения провода обмоток проводится по формуле:

$$d_{\text{провода}} = 1,13 \sqrt{\frac{i}{j_m}}, \quad (3.22)$$

где j_m – допустимая плотность тока по условиям теплоотвода.

Расчет элементов электрических и механических цепей магнитострикционного излучателя проводится следующим образом:

– амплитудное значение движущей силы определяется из выражения

$$F_m = 2\pi \tilde{a} B_m S_c; \quad (3.23)$$

– площадь поперечного сечения стенки излучателя, может быть вычислена по формуле:

$$S_c = \frac{1}{2} S_{\text{изл поверх}}; \quad (3.24)$$

– площадь излучающей поверхности определяется из выражения:

$$S_{\text{изл поверх}} = D_{\text{вн}} \cdot \pi \cdot d; \quad (3.25)$$

– сопротивление излучения:

$$R_s = k \cdot \rho \cdot C \cdot S_{\text{изл поверх}}; \quad (3.26)$$

где k – безразмерный коэффициент, определяемый активной и реактивной составляющими сопротивления излучения [159];

– потребляемая излучателем электрическая мощность:

$$P_{\Pi} = P_{\text{эл}} + P_{\text{м}}, \quad (3.27)$$

где $P_{\text{м}} = P_{\text{акт}} + P_{\text{мп}}$ – механическая мощность; $P_{\text{мп}}$ – мощность механических потерь; $P_{\text{эл}} = 2\sigma_n B^2 V$ – мощность электрических потерь; σ_n – коэффициент, учитывающий потери на гистерезис, зависит от f (находим по специальным графикам или таблицам).

Из литературы [159] известно, что $P_{\text{м}} = \frac{P_{\text{акт}}}{\eta_{\text{ам}}}$, где $\eta_{\text{ам}} = \frac{\eta_{\text{аэ}}}{\eta_{\text{мэ}}}$, причём $\eta_{\text{мэ}} \in [0,7; 0,9]$ – механико-индуктивный к.п.д.; $\eta_{\text{аэ}} \in [0,2; 0,5]$ – акусто-электрический к.п.д.

В случае поляризованного цилиндрического излучателя акустическая мощ-

ность на резонансной частоте:

$$P_{\text{акт}} = \frac{(2\pi)^2 \sigma^2 B_m^2 S^2 \eta_{\text{а. м}}^2}{2R_S}, \quad (3.28)$$

где $\eta_{\text{а. м}} = 0,7 - 0,8$ – акусто-механический к.п.д.

Интенсивность акустических колебаний, излучаемых в жидкость от магнито-стрикционного излучателя, обычно составляет $1,5 - 2$ Вт/см².

Мощность, теряемая за счет вихревых токов P_B , вычисляется по формуле (2.177). Потеря мощности за счет гистерезиса P_T определяется из выражения (2.178). Масса магнитопровода определяется из выражения (3.19).

Электрическая мощность, потребляемая излучателем, определяется по формуле:

$$P = P_{\text{акт}} + (P_B + P_T) \cdot m_c. \quad (3.29)$$

Коэффициент полезного действия кольцевого (цилиндрического) магнито-стрикционного излучателя находится из соотношения:

$$\eta_{\text{а. м}} = \frac{P_{\text{акт}}}{P}. \quad (3.30)$$

Рабочее напряжение первичной обмотки двух взаимосвязанных контуров:

$$U_c = i_1 \sqrt{R_{\text{ом}}^2 + R_{\text{инд}}^2}, \quad (3.31)$$

где $R_{\text{ом}} = \frac{\rho l_0 W_{\text{пер}}}{\pi d_{\text{провода}}^2}$ – омическое сопротивление катушки; $R_{\text{инд}}$ – индуктивное сопротивление катушки; i_1 – ток первичной обмотки [150].

В акусто-магнитном аппарате возбуждается магнитная индукция, которая складывается из индукции $B_i e^{j\omega t}$, обусловленной переменным током i , и из индукции B_m , обусловленной обратным магнито-стрикционным эффектом:

$$B_m = \frac{(P_a \cdot R_{\text{сп}})^{1/2}}{2\pi S_{\text{изл}} \text{поверх} \eta_{\text{а. м}}}. \quad (3.32)$$

Путь жидкости в активной зоне аппарата вычисляется по формуле (2.172). Площадь проходного сечения воды в рабочем зазоре находится по формуле (2.173). Внутренний диаметр корпуса определится по формуле (2.171). После выбора диаметра трубы уточняется высота проходного сечения:

$$r = 0,5 d_{\text{вн}} \sqrt{d_{\text{вн}}^2 - \frac{4S_B}{\pi}}. \quad (3.33)$$

После намотки излучателя и подключения его к генератору, производится окончательная регулировка величины числа витков, тока намагничивания и напряжения возбуждения. Это возможно только экспериментально, по максимальной интенсивности магнитострикционного излучателя. Необходимость корректировки параметров объясняется значительными вариациями магнитных свойств магнитострикционных материалов, которые обусловлены значительным изменением этих свойств в процессе изготовления.

3.4 Выбор теплового режима работы акусто-магнитного аппарата

В литературе, посвященной вопросам расчета теплового режима работы электромагнитных устройств, предлагается много подходов. Недостатком предлагаемых методов является использование большого числа эмпирических величин (например, тепловых сопротивлений), которые зависят от размеров и других параметров электромагнитных устройств. Поэтому практически невозможно построить математическую тепловую модель электромагнитных устройств, соответствующую широкому ряду номинальных мощностей электромагнитных устройств. Кроме того, при таких подходах расчетные параметры принимаются постоянными, не зависящими от температуры электромагнитных устройств, что не соответствует реальности – ведь омическое сопротивление проводов обмоток зависит от температуры. Автором предложена модель теплового режима акусто-магнитного аппарата, позволяющая не только рассчитать установившийся тепловой режим, но и проанализировать динамику нагрева. При этом модель содержит всего лишь один эмпирический коэффициент, а именно: коэффициент теплообмена. При составлении модели акусто-магнитного аппарата система рассматривается с распределенными параметрами. Такой подход обусловлен тем, что источники нагрева акусто-магнитного аппарата, обмотки и магнитопровод можно считать изотропными источниками тепла. Такое допущение сделано по следующим причинам: во-первых, обмотки распределены равномерно по всей площади магнито-

провода; во-вторых, благодаря очень высокой теплопроводности материалов обмоток и магнитопровода (меди и феррита) происходит «перемешивание» тепловых потоков обмоток и магнитопровода; в-третьих, магнитопровод является однородным для теплового потока во всех направлениях. Тепловые потоки от обмоток акусто-магнитного аппарата (АМА) через его внешнюю поверхность рассеиваются в окружающую среду. Тепловой поток от магнитопровода отводится в окружающее пространство, пройдя внутреннюю границу раздела между обмотками АМА и магнитопроводом. На границе раздела находится изоляционный материал, который нарушает однородность теплового потока. Для упрощения математической модели можно пренебречь тепловыми процессами, протекающими на внутренней границе раздела. Установленное значение температуры перегрева АМА зависит от эффективности отвода тепла с его поверхности. Эффективность отвода тепла определяется коэффициентом теплопередачи, который характеризует мощность, отводимую от поверхности агрегата при изменении температуры на один градус.

Значение коэффициента зависит от условий охлаждения. Так, например, для АМА, размещенного в большом помещении на плоской поверхности, и АМА, принудительно обдуваемого вентилятором, коэффициенты теплообмена различны. Во втором случае эффективность охлаждения выше, а значит, и коэффициент теплообмена будет больше. В соответствии с законом конвективного теплообмена (закон Ньютона) [65] будем считать, что тепловой поток пропорционален разности температур окружающей среды и поверхности АМА. Расчет теплового режима аппарата связан с расчетом температурного поля, что всегда представляет определенные трудности. С другой стороны, нет необходимости знать точное значение температуры перегрева в каждой точке АМА, поэтому принято решение рассматривать только среднюю по объему температуру перегрева, зависящую от времени. Такой подход позволяет не только определить температуру перегрева АМА, но и оценить динамику теплового процесса. Для расчета теплового режима АМА применим уравнение теплопроводности, записанное в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\lambda_{\text{тепл}}}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{1}{c\rho} p(r, z, \varphi, t), \quad (3.34)$$

где T – температура; $\lambda_{\text{тепл}}$ – коэффициент теплопроводности; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность материала; t – текущее время; r, z, φ – цилиндрические координаты.

Плотность мощности источника энергии $p(r, z, \varphi, t)$, в правой части дифференциального уравнения (3.34) является причиной возникающего нагрева АМА. В общем случае плотность мощности $p(r, z, \varphi, t)$ является функцией координат и времени. Зависимость p от координат подтверждает то, что в каждой точке объема находится источник тепла, и что по объему энергия распределена неравномерно. Из рассуждений, которые приводились выше, следует, что для АМА следует принять в качестве источника тепла потери в обмотках (потери в меди) и потери в феррите. Заметим, что природа потерь в сердечнике чрезвычайно сложна. Никому до сих пор не удалось представить аналитический расчет, который позволил бы предсказать потери в сердечнике в зависимости от структуры материала и химического состава. Все данные о потерях в сердечнике являются исключительно эмпирическими, причём не имеет значения материал сердечника (устаревшая сталь для строчных трансформаторов или самый последний образец высокочастотного феррита от современного производителя), но по объему АМА они распределены равномерно, и в каждой точке объема выделяется одинаковая энергия. Таким образом, в дальнейшем будем считать, что плотность мощности не зависит от координат, но зависит от времени. Омические потери в обмотках АМА выражаются формулой:

$$P_M = r_1 i_1^2 + r_2 i_2^2, \quad (3.35)$$

где r_1, r_2 – омические сопротивления первичной и вторичной обмоток АМА; i_1, i_2 – полные токи первичной и вторичной обмоток.

Для экспериментального определения величины потерь в обмотках АМА делается опыт короткого замыкания. АМА, таким образом, превращается в двухполюсник, связанный с внешними цепями только полюсами первичной обмотки. Используя понятие эквивалентного сопротивления r_0 , выражение (3.35) можно

привести к следующему виду:

$$P_M = r_0 i_1^2. \quad (3.36)$$

В литературе [146] можно встретить следующее выражение для вычисления приведенного сопротивления:

$$r_0 = r_1 + n_{\text{тр}}^2 r_2, \quad (3.37)$$

где $n_{\text{тр}}$ – коэффициент трансформации, причем $n_{\text{тр}} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{W_1}{W_2}$.

Последнее выражение справедливо для $n_{\text{тр}}$ лишь в том случае, если пренебречь током намагничивания магнитопровода и потерями в феррите.

Вторая группа потерь в АМА – это потери в магнитопроводе. Наиболее точное определение потерь энергии в сердечнике может быть осуществлено по данным импульсной петли гистерезиса частного цикла. Строгое аналитическое определение потерь связано с громоздкими вычислениями и практически не является рациональным. Достаточно точная для практических целей оценка потерь энергии в сердечнике может быть получена, исходя из эквивалентной электрической схемы замещения сердечника.

Согласно электрической схеме замещения сердечника энергия, поступающая в сердечник за время t_n действия рабочего импульса, определяется энергией, поглощаемой двумя ветвями схемы $L_{\text{ст}}$ и $R_{\text{п}}$, а именно:

– W_p – энергия, рассеиваемая в сердечнике;

$$W_p = \frac{U_m^2 t_n}{R_{\text{п}}} = \frac{\Delta B^2 S l}{R_0 t_n}; \quad (3.38)$$

– W_H – энергия намагничивания, т.е. энергия, передаваемая в нагрузку или запасаемая в сердечнике:

$$W_H = \frac{U_m^2 t_n^2}{2L_{\text{ст}}} = \frac{\Delta B^2 S l}{2\mu_0 \mu_{\Delta}}. \quad (3.39)$$

Энергия, рассеиваемая сердечником (3.38), прямо пропорциональна квадрату перепада индукции и обратно пропорциональна длительности импульса и сопротивлению потерь. Из уравнения (3.39) видно, что энергия намагничивания не зависит от длительности импульса и определяется приращением индукции и проницаемостью сердечника. После дальнейшего преобразования получаем следую-

щее выражение для значения энергии, прикладываемой к сердечнику:

$$P_{\phi} = \frac{\Delta B^2 S l}{2\mu_0 \mu_{\Delta}} \left(1 + \frac{2\tau_p}{t_n}\right). \quad (3.40)$$

Запасённая в сердечнике энергия намагничивания рассеивается в течение длительного интервала времени частично на активных сопротивлениях внешней цепи, частично в самом сердечнике. Точный учет распределения запасённой энергии требует знания всех параметров внешней цепи.

Таким образом, полная мощность потерь определяется как сумма потерь в меди и потерь в феррите и выражается формулой:

$$P = r_0 i_1^2 + P_{\phi}. \quad (3.41)$$

Рассмотрим АМА, у которых обмотки выполнены медным проводом. Как известно, у медного проводника сопротивление линейно зависит от температуры. Другими словами, сопротивление пропорционально разности температур окружающей среды и провода. Учитывая сказанное, для суммарных потерь в трансформаторе запишем:

$$P = [1 + \chi(T_n - T_{охл})] r_0 i^2 + P_{\phi}, \quad (3.42)$$

Для того чтобы определить правую часть уравнения теплопроводности, необходимо подставить в него выражение (3.42), деленное на объем V АМА. Плотность мощности обозначим малыми (строчными) буквами p, p_1, p_0 . Из (3.42) запишем:

$$p = [1 + \chi(T_n - T_{охл})] p_1 + p_0, \quad (3.43)$$

где $p_1 = \frac{r_0 i^2}{V}$ и $p_0 = \frac{P_{\phi}}{V}$ – плотность потерь в меди и феррите соответственно.

Выражение (3.43) определяет правую часть уравнения (3.34), которая оказывается зависимой от температуры и времени. Возвращаясь к вопросу охлаждения АМА, условимся считать, что на границе поверхности АМА и окружающей среды происходит теплообмен по закону Ньютона. Согласно этому закону, граничные условия для дифференциального уравнения (3.34) имеют вид:

$$\left[-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_n - T_{охл}) \right]_{F_0}, \quad (3.44)$$

где $\frac{\partial T}{\partial n}$ – производная по нормали к поверхности АМА; F_0 – площадь поверхности АМА; α – коэффициент теплообмена АМА с окружающей средой.

С окружающей средой теплообмен АМА осуществляется через боковые и торцевые поверхности. Поэтому, в общем случае, для задания условий охлаждения необходимо ввести коэффициент теплопередачи для каждой поверхности АМА. Варьируя коэффициенты теплопередачи, есть возможность смоделировать различные условия охлаждения АМА. Теплообмен АМА с окружающей средой осуществляется через две боковые и две торцевые поверхности. Из общего граничного условия (3.37) необходимо получить граничные условия для каждой поверхности. Для этого необходимо взять производную от температуры по нормали к поверхности. Тогда для внутренней боковой цилиндрической поверхности АМА на основании (3.35) запишем:

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= -\lambda n \cdot \text{grad}(T) = -\lambda(-e_r) \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial r} e_r + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} e_\varphi + \frac{\partial T}{\partial z} k \right) = \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_{\text{внАМА}}} = \\ &= \alpha_1 (T_n - T_{\text{охл}}), \end{aligned} \quad (3.45)$$

где e_r, e_φ, k орты цилиндрической системы координат, а точка (\cdot) обозначает скалярное произведение; α_1 – коэффициент теплообмена для внутренней цилиндрической поверхности АМА.

Используя формулу (3.44), запишем граничные условия для боковой поверхности АМА:

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= -\lambda n \cdot \text{grad}(T) = -\lambda(e_r) \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial r} e_r + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} e_\varphi + \frac{\partial T}{\partial z} k \right) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_{\text{нарАМА}}} = \\ &= \alpha_2 (T_n - T_{\text{охл}}), \end{aligned} \quad (3.46)$$

где α_2 – коэффициент теплообмена для боковой поверхности АМА.

Задавая вектор нормали к торцевым поверхностям АМА, из общего выражения (3.44) получим граничные условия на торцевых поверхностях. На нижней торцевой поверхности АМА с коэффициентом теплообмена α_3 будем иметь:

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= -\lambda n \cdot \text{grad}(T) = -\lambda(-k) \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial r} e_r + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} e_\varphi + \frac{\partial T}{\partial z} k \right) = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \\ &= \alpha_3 (T_n - T_{\text{охл}}). \end{aligned} \quad (3.47)$$

Для верхней торцевой поверхности АМА получим:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\lambda n \cdot \text{grad}(T) = -\lambda k \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial r} e_r + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} e_\varphi + \frac{\partial T}{\partial z} k \right) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h} = \alpha_4 (T_n - T_{\text{охл}}). \quad (3.48)$$

В соответствии с принятым ранее допущением определим температуру АМА как среднюю температуру по объему [94]:

$$\Theta = \frac{1}{V} \int_V T r dr dz d\varphi. \quad (3.49)$$

Граничные условия (3.44) для средней температуры перепишем в виде:

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} &= \alpha_3 (\Theta - T_{\text{охл}}), \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_{\text{нарАМА}}} = \alpha_2 (\Theta - T_{\text{охл}}), \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h} &= \alpha_4 (\Theta - T_{\text{охл}}), \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_{\text{внАМА}}} = \alpha_1 (T_n - T_{\text{охл}}). \end{aligned} \quad (3.50)$$

Проинтегрируем уравнение теплопроводности (3.34) по объему:

$$\begin{aligned} \frac{1}{V} \int_V \frac{\partial T}{\partial t} r dr dz d\varphi &= \frac{\lambda}{c\rho} \frac{1}{V} \left(\int_V \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr dz d\varphi + \int_V \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} r dr dz d\varphi \right) + \\ &+ \frac{1}{c\rho} \frac{1}{V} \int_V p r dr dz d\varphi. \end{aligned} \quad (3.51)$$

При интегрировании было сделано допущение, что температура АМА не зависит от угловой координаты φ в силу очевидной симметрии задачи, а также принято во внимание равенство $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$. В первом интеграле (3.51) поменяем местами операции дифференцирования и интегрирования, а также воспользуемся определением средней температуры (3.49). В результате этого получим [91]:

$$\frac{1}{V} \int_V \frac{\partial T}{\partial t} r dr dz d\varphi = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{V} \int_V T r dr dz d\varphi \right) = \frac{\partial \Theta}{\partial t}. \quad (3.52)$$

Второе слагаемое в (3.42) можно проинтегрировать по переменной r в пределах от $R_{\text{внАМА}}$ до $R_{\text{нарАМА}}$. После интегрирования второе слагаемое уравнения (3.42) преобразуется в интеграл по боковой поверхности АМА и принимает вид:

$$\frac{\lambda}{c\rho} \frac{1}{V} \left(\int_V \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr dz d\varphi \right) = \frac{1}{c\rho} \frac{1}{V} \left(\int_{S_b} r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{R_{\text{нарАМА}}}^{R_{\text{внАМА}}} dz d\varphi \right). \quad (3.53)$$

Подставив граничные условия из (3.48) в (3.51), после интегрирования получим:

$$\frac{1}{c\rho V} \left(\int_{S_b} r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{R_{\text{нарАМА}}}^{R_{\text{внАМА}}} dzd\varphi \right) = -\frac{2\pi h(\alpha_1 R_{\text{внАМА}} + \alpha_2 R_{\text{нарАМА}})}{c\rho V} (\Theta - T_{\text{охл}}). \quad (3.54)$$

Третий член уравнения (3.51) после интегрирования по объему и с учетом граничных условий (3.50) примет вид [94]:

$$\frac{\lambda}{c\rho V} \left(\int_V \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} r dr dz d\varphi \right) = -\frac{\pi(\alpha_3 + \alpha_4)(R_{\text{внАМА}}^2 - R_{\text{нарАМА}}^2)}{c\rho V} (\Theta - T_{\text{охл}}). \quad (3.55)$$

В правую часть уравнения (3.51) подставим плотность мощности из (3.34):

$$\frac{1}{c\rho V} \int_V prpzp\varphi = \frac{1}{c\rho V} \int_V [p_0 + p_1 + X(T_n - T_{\text{охл}})p_1] r dr dz d\varphi. \quad (3.56)$$

После интегрирования (3.56) с учетом (3.49) получим:

$$\frac{1}{c\rho V} \int_V [p_0 + p_1 + X(T_n - T_{\text{охл}})p_1] r dr dz d\varphi = \frac{p_0 + p_1 + X(\Theta - T_{\text{охл}})p_1}{c\rho}. \quad (3.57)$$

Полученные выражения (3.52), (3.54), (3.55) и (3.57) подставим в уравнение (3.51), тогда будем иметь [94]:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{F_{\text{тор}}}{c\rho V} (\Theta - T_{\text{охл}}) = \frac{p_0 + p_1 + X(\Theta - T_{\text{охл}})p_1}{c\rho}, \quad (3.58)$$

где параметр $F_{\text{тор}}$ введен для сокращения записи:

$$F_{\text{тор}} = 2\pi h(\alpha R_{\text{нарАМА}} + \alpha_2 R_{\text{внАМА}}) + \pi(\alpha_3 + \alpha_4)(R_{\text{нарАМА}}^2 - R_{\text{внАМА}}^2). \quad (3.59)$$

Приведем уравнение (3.58) к нормальному виду:

$$\frac{d(\Theta - T_{\text{охл}})}{dt} = \frac{(\Theta - T_{\text{охл}})}{c\rho} \left(\frac{F_{\text{тор}}}{V} - \chi p_0 \right) + \frac{p_0 + p_1}{c\rho}. \quad (3.60)$$

Таким образом, для температуры перегрева аппарата получено обыкновенное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами (3.60) [94].

Проинтегрируем уравнение (3.60) при начальных условиях

$$\Theta(0) = T_{\text{охл}} \quad (3.61)$$

и получим:

$$\Theta - T_{\text{охл}} = \frac{V p_0 + V p_1}{F_{\text{тор}} - \chi V p_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (3.62)$$

где выражение для постоянной времени τ имеет вид:

$$\tau = \frac{c\rho V}{F_{\text{тор}} - \chi V p_1}. \quad (3.63)$$

Введём обозначение для массы АМА $M = pV$, перепишем (3.63) в виде:

$$\tau = \frac{cM}{F_{\text{top}} - \chi V p_1}. \quad (3.64)$$

В расчетах используется средняя по массе величина теплоемкости, которая определяется формулой [94]:

$$c = \frac{c_m m_M + c_c m_c + \sum c_i m_i}{m_M + m_c + \sum m_i}, \quad (3.65)$$

где c_m, c_c, c_i - теплоемкость меди, стали и других материалов, m_M, m_c, m_i - масса меди, стали и других материалов.

Учитывая, что масса меди и стали составляет 90% от полной массы АМА, при расчете средней теплоемкости можно принимать в расчет только теплоемкость меди и стали. Следует также заметить, что величина средней теплоемкости влияет только на параметры переходного процесса нагревания и не влияет на значение установившейся температуры. Учитывая, что $V_{p_1} = r_0 i^2$ и $V_{p_0} = P_c$, формула для расчета температуры перегрева АМА (3.62) и выражение для постоянной времени τ преобразуются к виду:

$$\Theta - T_{\text{охл}} = \frac{r_0 i_1^2 + P_c}{F_{\text{top}} - \chi r i_1^2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (3.66)$$

$$\tau = \frac{cM}{F_{\text{top}} - \chi r i_1^2}. \quad (3.67)$$

Формула (3.66) дает возможность оценить динамику нагрева и определить установившуюся температуру перегрева АМА [94].

Тогда, вычисляя предел (3.66) при $t \rightarrow \infty$, получим выражение для установившейся температуры перегрева в виде:

$$\Theta - T_{\text{охл}} = \frac{r_0 i_1^2 + P_c}{F_{\text{top}} - \chi r i_1^2}. \quad (3.68)$$

Выражение (3.68) показывает, что при постоянной нагрузке и по истечении достаточно большого времени АМА нагреется до температуры $\Theta = \text{const}$. Поскольку заранее неизвестно, какие факторы и как именно будут влиять на значения коэффициентов теплопередачи в конкретных условиях эксплуатации АМА, предположим, что условия охлаждения АМА одинаковы по всей поверхности, а все коэффициенты теплопередачи равны между собой:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5. \quad (3.69)$$

Подставив (3.69) в (3.59) и перегруппировав члены в (3.59), получим:

$$F_{\text{тор}} = \alpha_0 [2\pi(R_{\text{нарАМА}}^2 - R_{\text{внАМА}}^2) + 2\pi h(R_{\text{внАМА}} + R_{\text{нарАМА}})]. \quad (3.70)$$

Выражение, стоящее в квадратных скобках, определяет площадь поверхности тороида: первое слагаемое – площадь торцевой поверхности, второе слагаемое – площадь боковой поверхности. Перепишем формулу (3.70) в виде:

$$F_{\text{тор}} = \alpha_0 F_0, \quad (3.71)$$

где $F_0 = 2\pi(R_{\text{нарАМА}}^2 - R_{\text{внАМА}}^2) + 2\pi h(R_{\text{внАМА}} + R_{\text{нарАМА}})$.

Учитывая (3.71), окончательное выражение для установившейся температуры перегрева АМА запишем в виде [94]:

$$\Theta - T_{\text{охл}} = \frac{r_0 i^2 + P_{\Phi}}{\alpha_0 F_0 - \chi r_0 i^2}. \quad (3.72)$$

3.5 Определение оптимального температурного режима работы акусто-магнитного аппарата

Во многих ситуациях практического использования ультразвука необходимо обеспечить работу излучателей в широком интервале температур. Даже при условии стабилизации температуры внешней среды, в режиме интенсивных колебаний появляется нагревание преобразователя за счет его собственных потерь [42]. Измерения обнаружили, что при интенсивности излучаемого в воду звука около 3 Вт/см² поверхность ферритовых сердечников нагревается на 10 – 30°. При этом в сердечнике возникают заметные температурные градиенты. Таким образом, при рассмотрении ферритов как материала для преобразователей, необходимо знать температурную зависимость их свойств [42].

Температурные характеристики ферритовых сердечников могут меняться в процессе работы аппарата. Рассмотрим вопрос о связи температурных изменений магнитной проницаемости μ_{Δ} с температурными изменениями параметров симметричной петли гистерезиса, технологические способы управления которыми достаточно хорошо известны.

Определим взаимосвязь температурных зависимостей параметров симметричной петли гистерезиса B_m, B_r и H_c с температурными зависимостями проницаемости частотного цикла μ_Δ . С этой целью проанализируем температурные характеристики параметров симметричной петли гистерезиса из [18], добавив расчетные значения $\Delta B_{ст} = B_m - B_r$, коэффициента прямоугольности $K_{пр} = \frac{B_r}{B_m}$ и температурных изменений Δ , %, всех этих величин.

В источнике [18] приведены параметры B_m, B_r, H_c ($H_m = 10H_c$) и рассчитанные параметры $k_{пр}, \mu_\Delta, \Delta$, %, для ферритов марки 1500НМ2. Из табл. 3.2 [18] видно, что в области малых полей температурные изменения H_c и μ_Δ почти везде имеют один и тот же знак. В связи с этим можно сделать предположение, что такое соответствие неслучайно и может быть объяснено следующим образом. Увеличение коэрцитивной силы с изменением температуры уменьшает относительную величину поля намагничивания $H_{ст}/H_c$, т.е. изменение проницаемости μ_Δ происходит как бы при меньшем поле намагничивания, где проницаемость выше, поэтому и температурное изменение μ_Δ получается также в сторону увеличения. Уменьшение коэрцитивной силы влечет за собой обратные явления.

Температурное изменение коэрцитивной силы не всегда является преобладающим фактором, влияющим на изменение μ_Δ , так как всегда с изменением поля намагничивания μ_Δ резко меняется, как, например, в области технического насыщения.

Вторым параметром симметричной петли гистерезиса, который может влиять на температурное изменение μ_Δ , является изменение его прямоугольности. Если при изменении температуры симметричная петля становится более прямоугольной, то проницаемость μ_Δ уменьшается. Это соответствие хорошо подтверждается для участка насыщения почти всех марок ферритов.

На основании анализа взаимосвязи температурных изменений проницаемости μ_Δ и параметров симметричной петли гистерезиса при разработке температуростабильных марок ферритов импульсного применения нужно стремиться использовать материал с малым изменением коэрцитивной силы и коэффициента

прямоугольности симметричной петли гистерезиса в заданном диапазоне температур. Кроме того, желательно, чтобы влияние температурных изменений этих величин на изменение проницаемости μ_{Δ} взаимно компенсировалось. Из сказанного также следует, что достижение температурной стабильности начальной проницаемости не гарантирует температурную стабильность проницаемости частного цикла в широком диапазоне полей и индукций.

Исследование характеристик $\mu_{\Delta}(H_{ст})$, $\Delta B_{ст}$, $\mu_{\Delta}(\Delta B_{ст})$ и $H_{ст}(\Delta B_{ст})$ большого числа партий ферритовых сердечников разных марок показало, что температурные изменения этих характеристик нелинейно зависят как от приложенного поля или перепада индукции, так и от изменения температуры.

На рисунках 3.6 и 3.7 приведены усредненные зависимости $\mu_{\Delta}(H_{ст})$, $\Delta B_{ст}(H_{ст})$, $\mu_{\Delta}(\Delta B_{ст})$ и $H_{ст}(\Delta B_{ст})$, измеренные при температурах 20; 100 и -60°C .

Из рисунка 3.6 видно, что при малых значениях напряжённости ([0;2,4], А/см) поля намагничивания проницаемость μ_{Δ} и перепад индукции $\Delta B_{ст}$ при температуре $+100^{\circ}\text{C}$ увеличиваются, а при большом поле намагничивания эти параметры уменьшаются; при температуре -60°C в малых полях намагничивания уменьшаются, а в больших увеличиваются. Температурное изменение зависимости $\mu_{\Delta}(H_{ст})$ и $\Delta B_{ст}(H_{ст})$ нелинейно зависит от поля (рис.3.7).

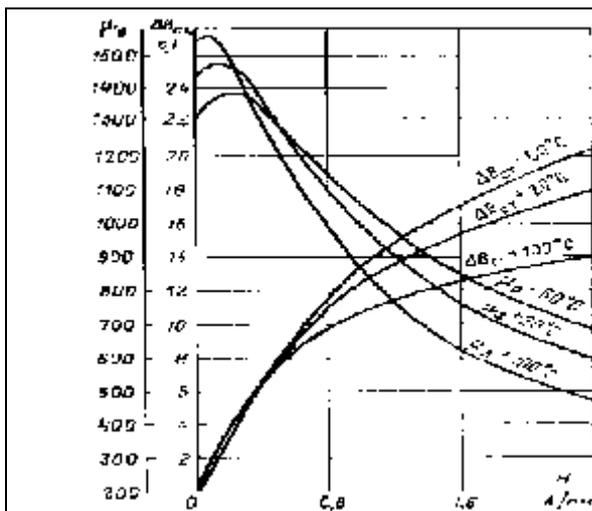


Рисунок 3.6 – Зависимость $\mu_{\Delta}(H_{ст})$ и $\Delta B_{ст}(H_{ст})$ сердечника марки 1100 НМИ

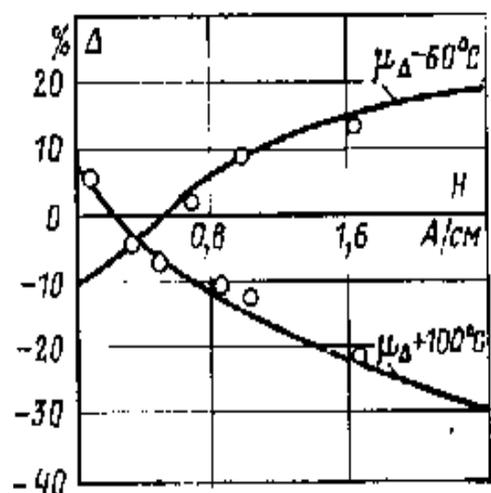
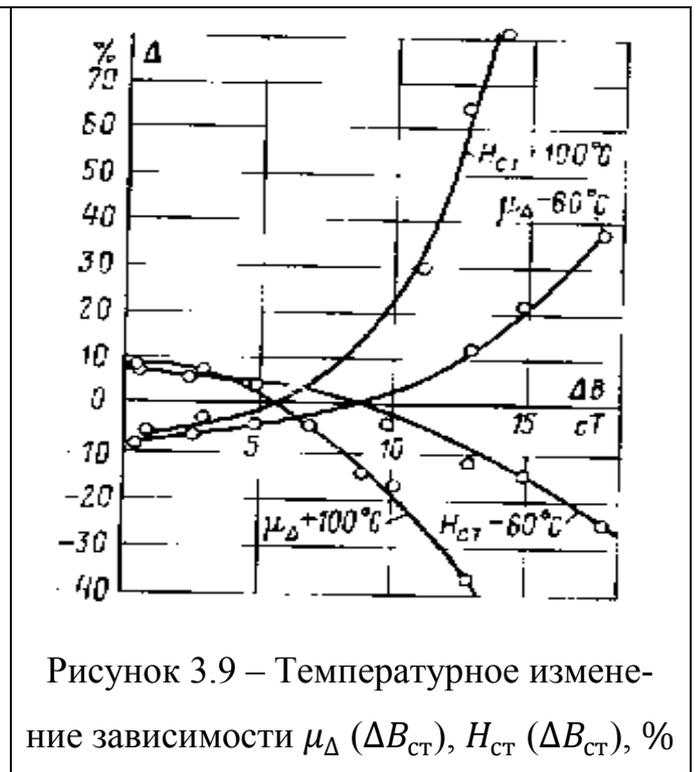
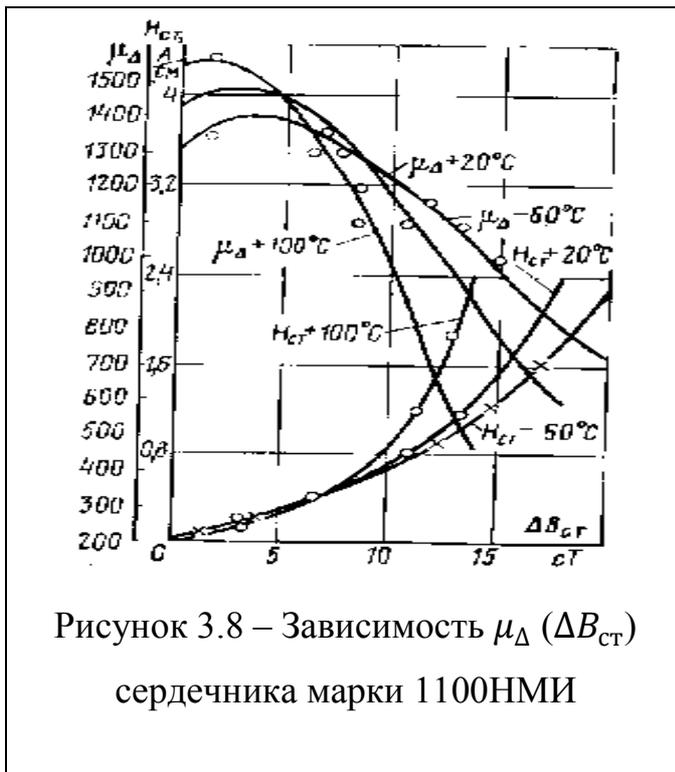


Рисунок 3.7 – Температурное изменение зависимости $\mu_{\Delta}(H_{ст})$, %

При различных значениях напряжённости магнитного поля оно имеет не только разные абсолютные величины, но и разные знаки. Исследование сердечников разных партий показало, что у большинства из них существует определенное поле, при котором температурные изменения практически отсутствуют. Однако, напряженность этого поля различна не только для сердечников разных партий, но часто для одного и того же сердечника при разных температурах.

Изменение μ_{Δ} и ($H_{ст}$) одного и того же сердечника при изменении температуры окружающей среды имеет противоположные знаки (рис.3.8 и 3.9). Проницаемость μ_{Δ} при малых перепадах индукции с повышением температуры до $+100^{\circ}\text{C}$ увеличивается, а поле $H_{ст}$ – уменьшается, при больших перепадах индукции проницаемость уменьшается, а поле увеличивается. Таким образом, температурные изменения зависимости μ_{Δ} ($\Delta B_{ст}$) не только нелинейно зависят от изменения перепада индукции, но и имеют противоположные знаки.



Кроме того, из рис. 3.8 видно, что абсолютные значения этих температурных изменений неодинаковы. Например, при перепаде индукции $\Delta B_{ст} = 14$ cT и температуре $+100^{\circ}\text{C}$ изменение μ_{Δ} составляет -47% , а изменение $H_{ст}$ составляет

+83%, при температуре -60°C изменение μ_{Δ} составляет +15%, а изменение $H_{\text{ст}}$ составляет -10% .

Несоответствие величин изменения μ_{Δ} и $H_{\text{ст}}$ при температуре объясняется двумя факторами. С одной стороны, поле $H_{\text{ст}}$ находится в обратно пропорциональной зависимости от μ_{Δ} , что определяет противоположные знаки температурных изменений. С другой стороны, μ_{Δ} и $H_{\text{ст}}$ нелинейно зависят от перепада индукции, что определяет неодинаковость абсолютных величин температурных изменений. Резкий рост $H_{\text{ст}}$ при больших перепадах индукции и температуре $+100^{\circ}\text{C}$ происходит потому, что при этой температуре переход в зону насыщения, где $H_{\text{ст}}$ резко возрастает происходит при меньших перепадах индукции. Рост напряженности поля намагничивания при температуре $+100^{\circ}\text{C}$ можно объяснить и тем, что крутизна зависимости $\Delta B_{\text{ст}}(H_{\text{ст}})$ при этом падает. Следует отметить, что чем круче зависимость $\Delta B_{\text{ст}}(H_{\text{ст}})$, тем меньше температурные изменения зависимости $H_{\text{ст}}(\Delta B_{\text{ст}})$, по сравнению с изменениями зависимости $\Delta B_{\text{ст}}(H_{\text{ст}})$.

После исследования температурных характеристик ферритовых сердечников нескольких марок 2000НМ1, 1500НМ3, 1000НМ3, 1100НМИ и 350ННИ оказалось, что температурные изменения зависимостей $\Delta B_{\text{ст}}(H_{\text{ст}})$, $\mu_{\Delta}(H_{\text{ст}})$ и $H_{\text{ст}}(\Delta B_{\text{ст}})$, значительно больше, чем температурные изменения начальной проницаемости. Это объясняется тем, что из-за нелинейности зависимости $\mu_{\Delta}(H_{\text{ст}})$ температуростабильную марку феррита для работы в АМА можно использовать только при условии получения температурной стабильности таких параметров симметричной петли гистерезиса, как коэрцитивная сила, остаточная и максимальная индукции [18].

Если выбрать рабочий режим с малыми значениями перепада индукции на начальном участке зависимости $\Delta B_{\text{ст}}(H_{\text{ст}})$, где проницаемость частного цикла максимальна (поле намагничивания минимально), то для передачи АМА одной и той же площади импульса потребуется большее сечение магнитопровода и большее число витков обмотки по сравнению с режимом работы на участке насыщения зависимости $\Delta B_{\text{ст}}(H_{\text{ст}})$. Увеличение сечения магнитопровода и числа витков

обмотки помимо увеличения габаритов АМА влечет за собой рост значений паразитных параметров [18].

Режим работы на участке насыщения зависимости $\Delta B_{\text{ст}}(H_{\text{ст}})$ влечет за собой резкий рост намагничивания при небольшом увеличении перепада индукции. На этом участке небольшое колебание величины перепада индукции, которое может быть связано, например, с колебанием напряжения в сети, влечет за собой резкое изменение тока намагничивания. Кроме того, при нагревании сердечника, когда перепад индукции насыщения с увеличением температуры уменьшается, температурные изменения поля намагничивания настолько велики (+200–300%), что возможность использования сердечников в этих режимах исключается.

Для выбора режима работы сердечников с явно выраженной нелинейностью зависимости $\Delta B_{\text{ст}}(H_{\text{ст}})$ даны удачные рекомендации в [18]. Зависимость $\Delta B_{\text{ст}}(H_{\text{ст}})$ разбивается на два линейных участка. Точка пересечения прямых, с помощью которых аппроксимируется зависимость $\Delta B_{\text{ст}}(H_{\text{ст}})$, названа концом линейного участка восходящей части зависимости $\Delta B_{\text{ст}}(H_{\text{ст}})$ и имеет координаты ΔB_0 и H_0 (рис. 3.10), где ΔB_0 является максимально допустимым перепадом индукция.

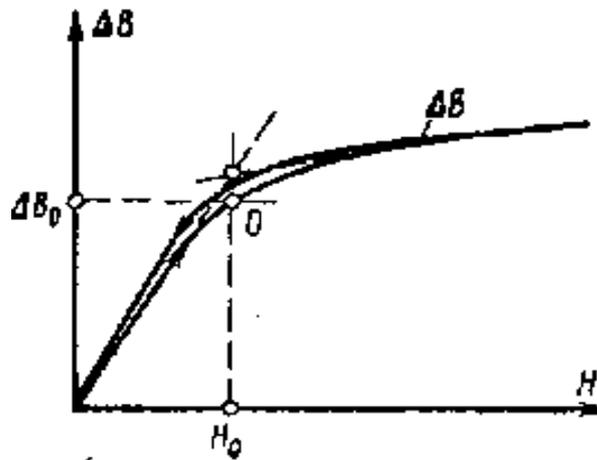


Рисунок 3.10 – Нахождение предельного значения $\Delta B = \Delta B_0$ при работе сердечника АМА

К этому следует добавить, что такое построение необходимо производить, используя зависимость $\Delta B_{\text{ст}}(H_{\text{ст}})$, измеренную при максимальной температуре предполагаемого нагрева сердечника. Конец восходящего участка зависимости

$\Delta B_{ст}(H_{ст})$ является участком с довольно большим перепадом индукции и с умеренными значениями напряженности полей намагничивания и их температурных изменений.

Влияние предыстории в области индукций, близких к значению ΔB_0 , почти отсутствует. Это является еще одной из причин выбора такого рабочего режима сердечника. Таким образом, параметры ΔB_0 и H_0 могут характеризовать предельный режим работы сердечника АМА, при котором насыщение сердечника незначительно ухудшает параметры АМА.

3.6 Моделирование физических процессов, происходящих в акусто-магнитном аппарате, в среде ELCUT

Первым этапом моделирования физических процессов, происходящих в акусто-магнитном аппарате, является создание задачи типа «Магнитное поле переменных токов» в среде ELCUT 6.1 для моделирования акусто-магнитного аппарата с тремя обмотками. Окно программы представлено на рисунке 3.11.

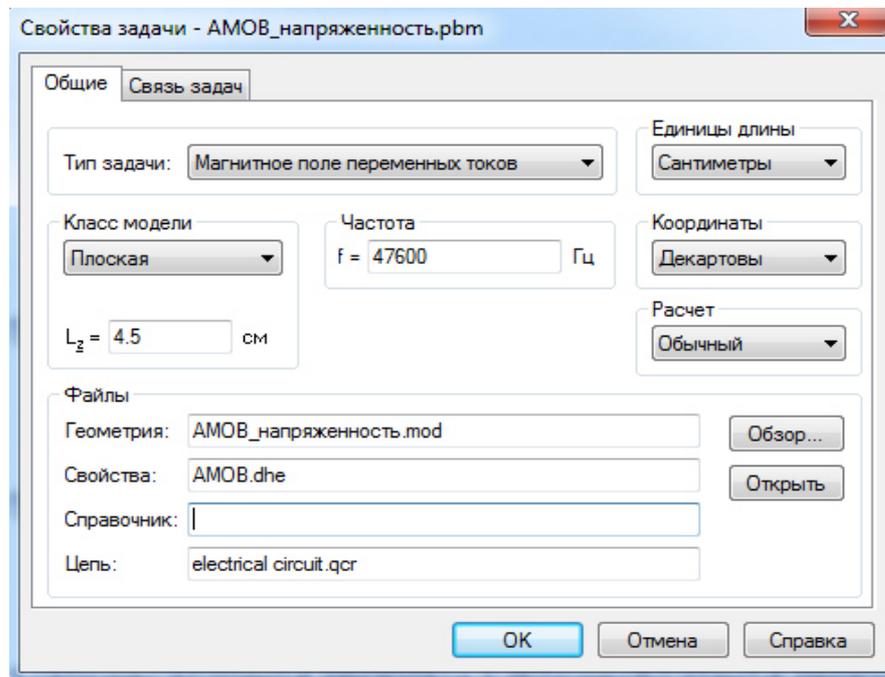
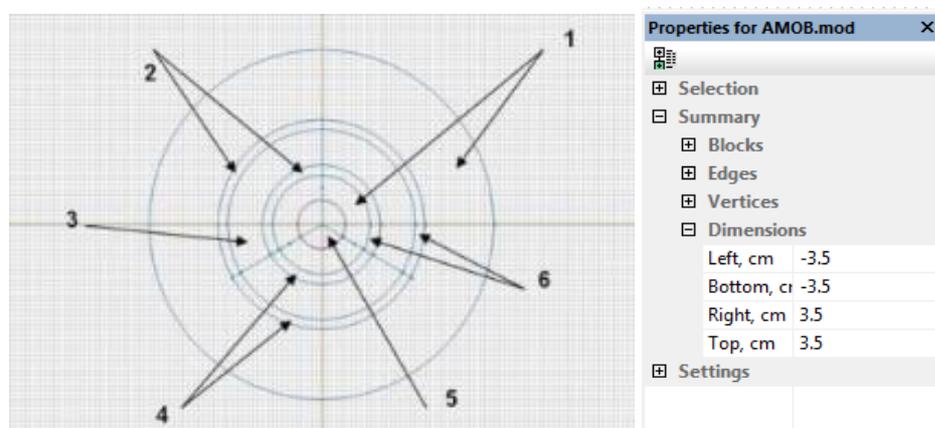


Рисунок 3.11 – Свойства задачи в среде ELCUT 6.1

После формулирования свойств решаемой задачи, приступим к построению геометрической модели аппарата [41]. Геометрическая модель аппарата в среде ELCUT 6.1 представлена в разрезе для более наглядного отображения картины магнитного поля (рисунок 3.12).



1 – корпус аппарата, 2 – первая обмотка, 3 – ферритовое кольцо, 4 – вторая обмотка, 5 – рабочая зона, 6 – третья обмотка.

Рисунок 3.12 – Геометрическая модель в среде ELCUT 6.1

После геометрического моделирования с помощью меток задаются физические свойства объектов, а также граничные условия. На одну обмотку приходится 120° окружности ферритового кольца. Частота, при которой моделируется работа аппарата, задается в окне создания задачи (рисунок 3.11), равна 47600 Гц. Выбор именно этого значения частоты обусловлен тем, что на данной частоте ферритовое кольцо, имеющее приемлемые размеры, входит в резонанс [19].

Затем создается электрическая цепь (рисунок 3.13) для питания аппарата. В качестве питания подавалось три импульсных напряжения различной формы: пилообразное напряжение, треугольное напряжение, меандр.

Далее строится сетка конечных элементов во всех используемых частях геометрической модели с шагом дискретизации 0,5. Геометрическая модель с сеткой конечных элементов представлена на рисунке 3.14. На рисунке 3.15 представлена картина магнитного поля при подаче на аппарат (с тремя обмотками) напряжения типа «меандр». На рисунке 3.16 представлена картина магнитного поля при подаче на аппарат (с тремя обмотками) треугольного напряжения.

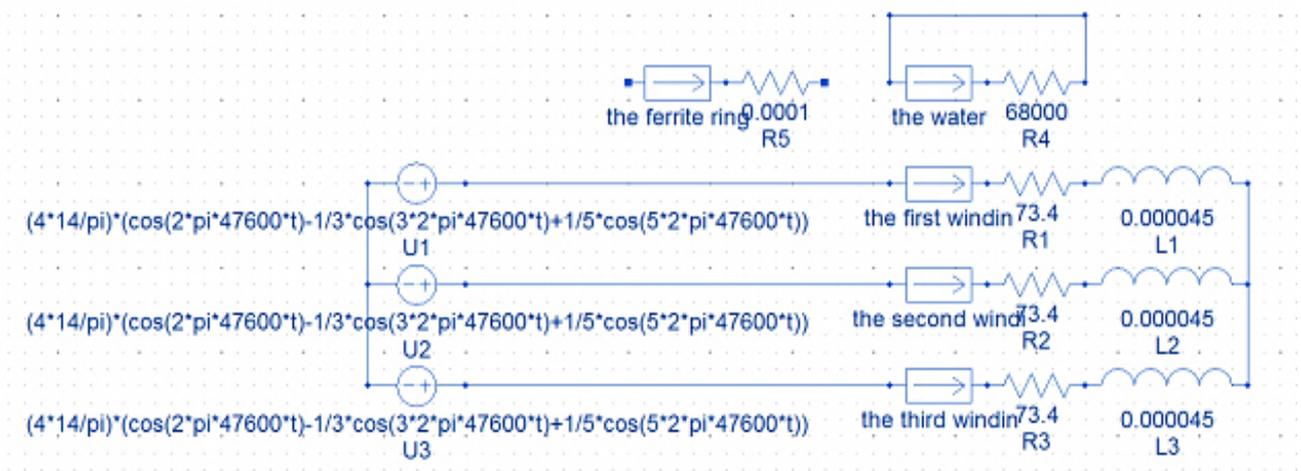


Рисунок 3.13 – Электрическая цепь в среде ELCUT 6.1 (форма сигнала «меандр»)

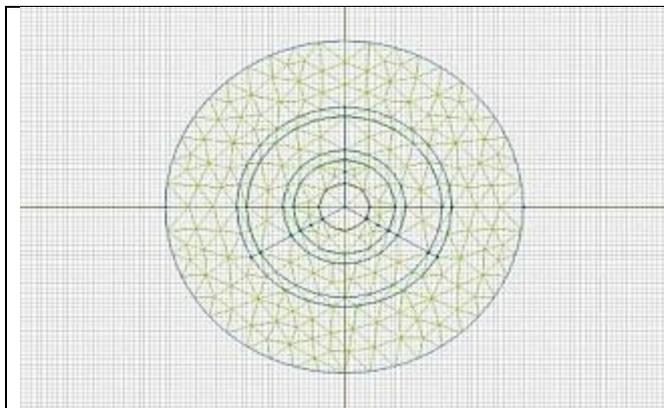


Рисунок 3.14 – Сетка конечных элементов в среде ELCUT 6.1

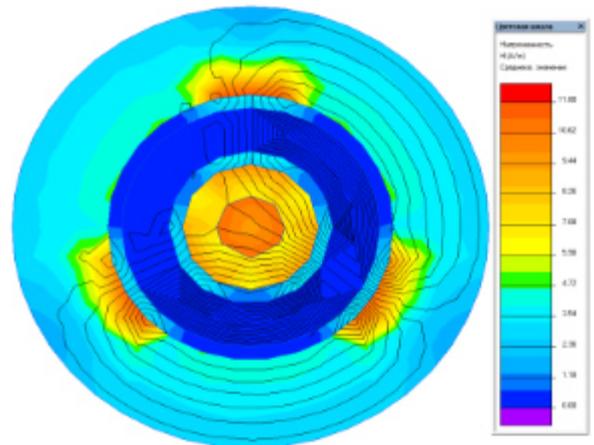


Рисунок 3.15 – Распределение максимальной напряженности при подаче напряжения типа «меандр»

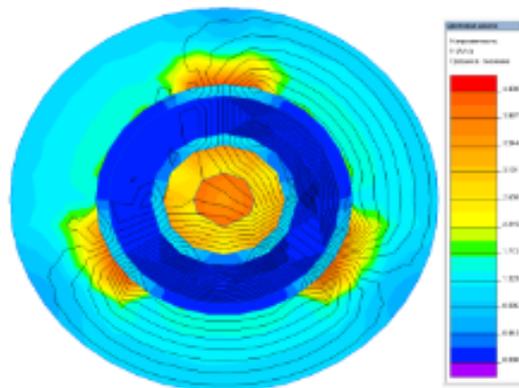


Рисунок 3.16 – Распределение максимальной напряженности при подаче треугольного напряжения

Следующим этапом является получение результатов решения задачи. На рисунке 3.17 представлена картина магнитного поля в зависимости от фазы подачи напряжения.

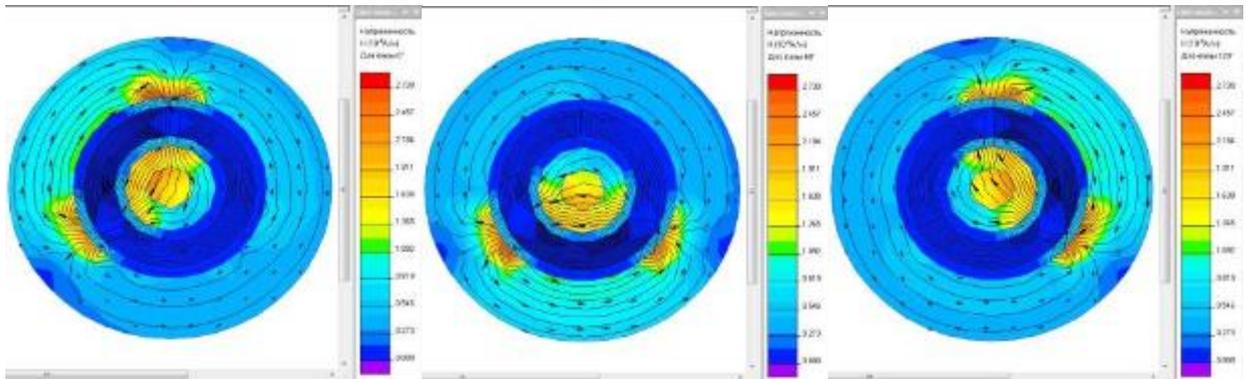


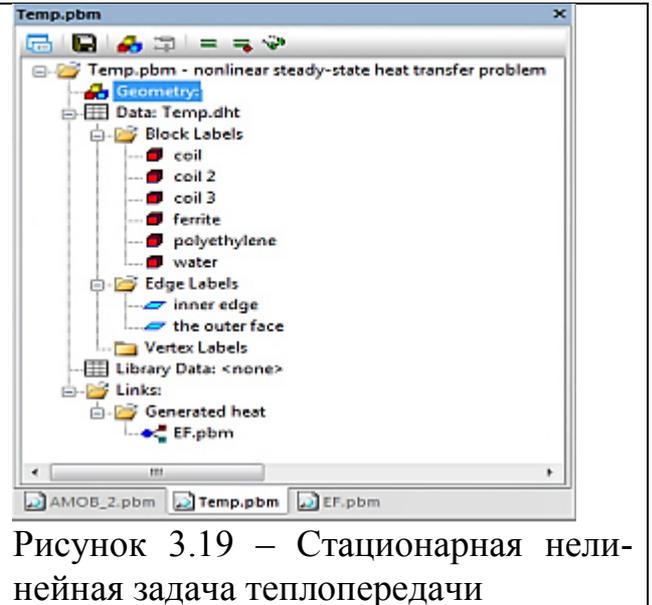
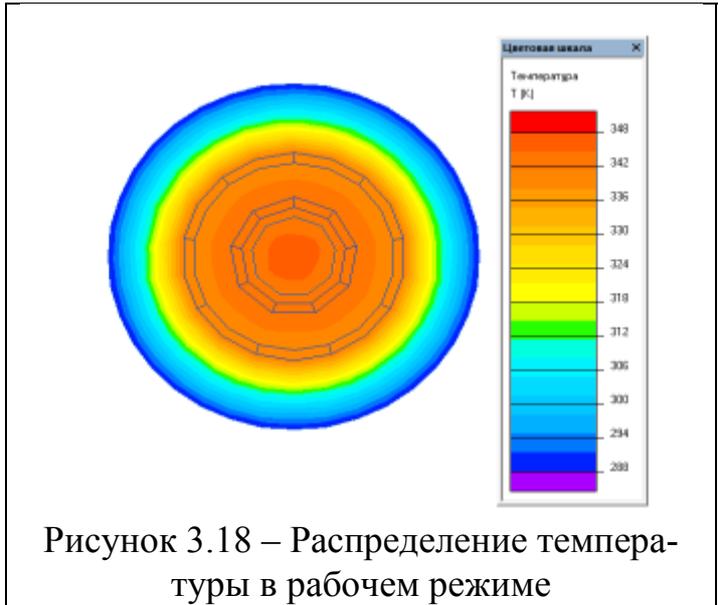
Рисунок 3.17 – Распределение максимальной напряженности в зависимости от фазы подачи напряжения [183]

Вторым этапом является создание задачи типа «Нелинейная задача стационарной теплопроводности» в среде ELCUT 6.1. Задача теплопроводности связана с предыдущей задачей. При переносе данных из задачи магнитного поля переменных токов, тепловые потери рассматриваются во всех проводящих областях.

Поскольку тепловой поток проходит через неоднородное тело тороидального магнитного контура, воздушные зазоры, межслойную и катушечную изоляцию, обмоточную проволоку, то тепловое поле аппарата становится очень сложным, поэтому для упрощения решения задачи была использована эквивалентная теплопроводность. γ

Распределение температуры в рабочем режиме представлено на рисунке 3.18. Стационарная нелинейная задача теплопередачи представлена на рисунке 3.19.

Анализ полученных результатов позволил построить таблицу максимальной/минимальной напряженности в рабочей зоне модели акусто-магнитного аппарата в зависимости от формы импульсного сигнала напряжения питания. Результаты представлены в таблице 3.1.



Исходя из результатов моделирования, максимальный градиент напряженности магнитного поля в рабочей зоне модели акусто-магнитного аппарата достигается при использовании в качестве напряжения питания импульсного сигнала типа «меандр».

С целью определения эффективности формы импульсного сигнала был произведен спектральный анализ. Основным критерием в сравнении сигналов была амплитуда гармоник в рабочем диапазоне частот аппарата. Анализ проводился в пакете прикладных программ MATLAB.

Сравнение амплитуд гармоник сигналов на графиках, наглядно показывает, что наибольшая часть энергии сосредоточена в первой гармонике, причем максимальная амплитуда напряжения, подаваемого на обмотки, достигается при форме меандр, в отличие от других форм импульсного напряжения.

Таблица 3.1 Полученные данные после моделирования

Форма сигнала	Максимальная напряженность, (А/м)	Минимальная напряженность, (А/м)
Меандр	11,8	$109 \cdot 10^{-5}$
Треугольное	4,43	$41 \cdot 10^{-5}$

Соответственно, возбуждаемый ток в обмотках аппарата и напряженность

магнитного поля при этой форме сигнала достигают наибольших значений. Градиент напряженности магнитного поля сосредотачивается в рабочей зоне аппарата. Максимально эффективной формой импульсного напряжения питания для акусто-магнитного аппарата является сигнал типа «меандр», что подтверждено экспериментальными исследованиями на стенде с замкнутым контуром и производственными испытаниями.

Третьим этапом является создание задачи типа «Задачи теории упругости». При расчете термических деформаций по полю температур, перенесенному из тепловой задачи, начальные деформации учитываются в каждой области (рис.3.20), включенной в рассмотрение в обеих задачах, если в ней задано ненулевое значение коэффициента теплового расширения (или хотя бы одной из его компонент в анизотропном случае).

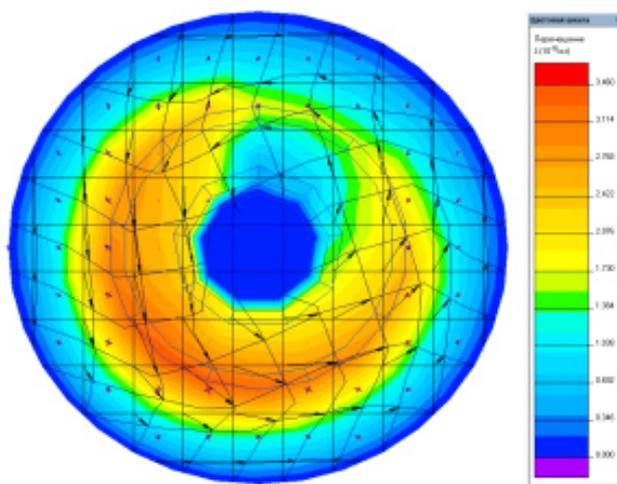


Рисунок 3.20 – Картина деформаций аппарата

Четвёртым этапом является создание задачи типа «Магнитное поле переменных токов» в среде ELCUT 6.1 для моделирования акусто-магнитного аппарата с девятью обмотками. Геометрическая модель аппарата представлена в разрезе на рисунке 3.21. Акусто-магнитный аппарат имеет девять рабочих обмоток и одну обмотку управления. Обмотки каждой фазы разнесены в пространстве на 120° по окружности ферритового кольца. Частота, при которой моделируется работа аппарата, задается в окне параметров задачи (рисунок 3.11), равна 47600 Гц.

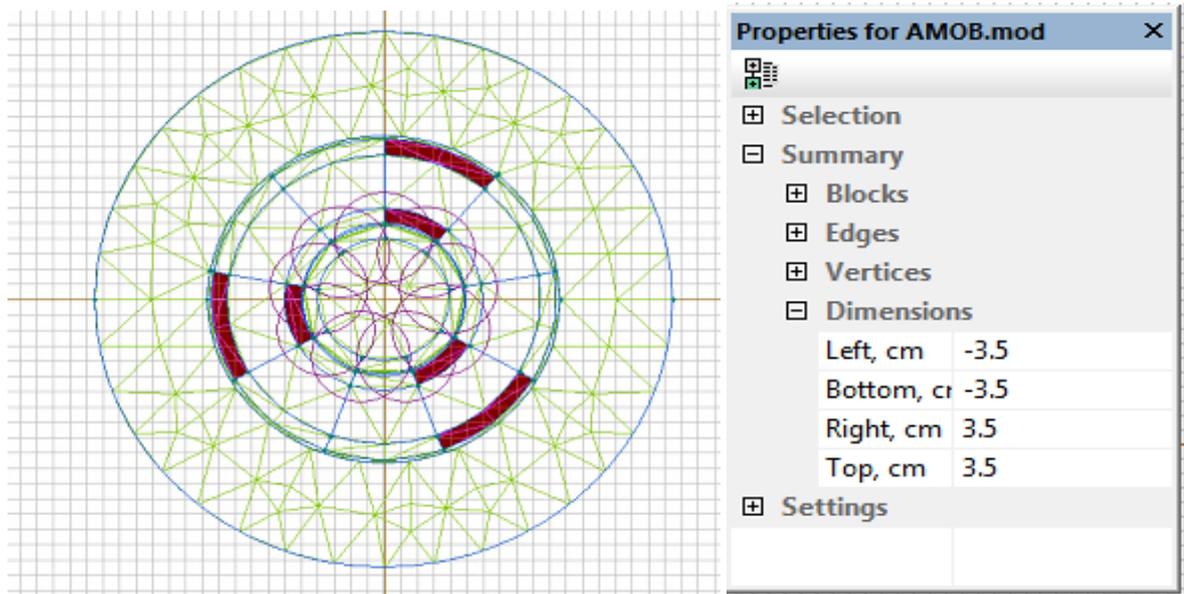


Рисунок 3.21 – Геометрическая модель акусто-магнитного аппарата, имеющего девять обмоток в среде ELCUT 6.1

Затем создается электрическая цепь (рисунок 3.22) для питания аппарата. Отличие электрической цепи состоит в том, что в метках блоков обмоток трёх фаз учтены токи взаимной индукции путём установления в метки блока источника поля. В качестве питания подавалось импульсное напряжение типа «меандр».

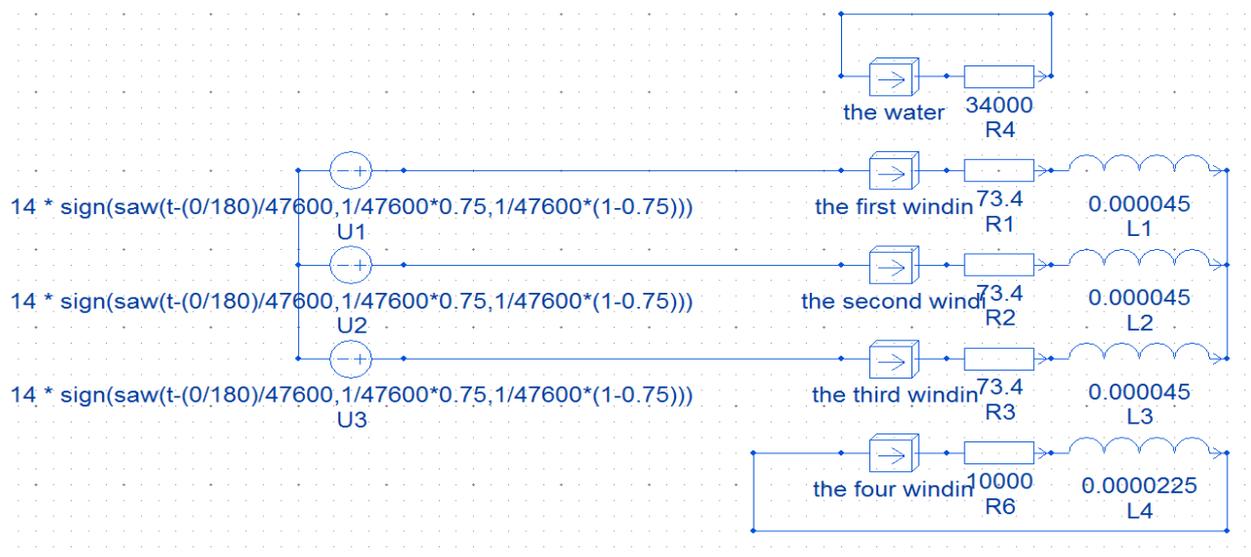


Рисунок 3.22 – Электрическая цепь в среде ELCUT 6.4

На рисунке 3.23 представлено среднеквадратическое действующее мгновен-

ное значение магнитной индукции, а на рисунке 3.24 распределение максимальной напряженности в зависимости от фазы подачи напряжения.

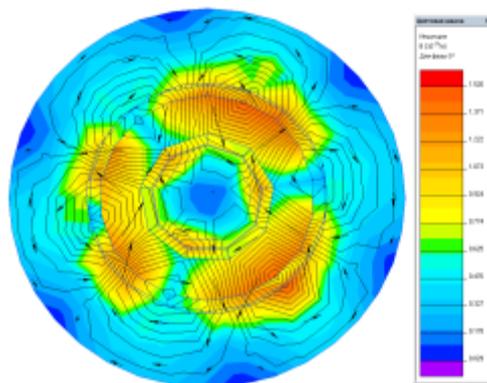


Рисунок 3.23 – Среднеквадратическое действующее значение магнитной индукции

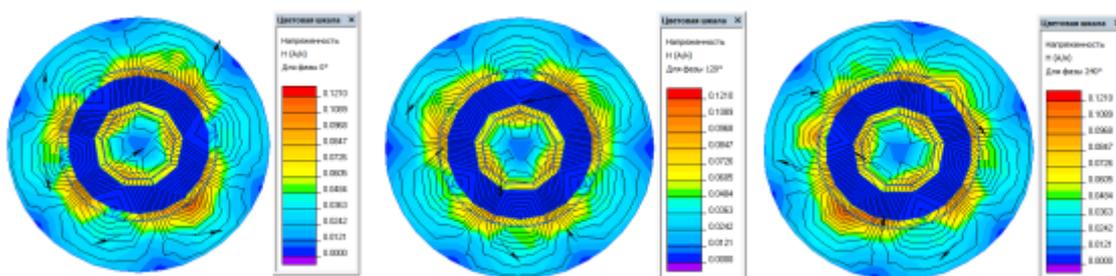


Рисунок 3.24 – Распределение максимальной напряженности в зависимости от фазы подачи напряжения

Анализ полученных результатов позволил построить таблицу зависимости среднего квадрата напряженности в рабочей зоне модели акусто-магнитного аппарата от частоты и длины рабочей зоны акусто-магнитного аппарата. Максимальное значение напряженности составило 18,48 А/м, что соответствует длине рабочей зоны аппарата 6,99 см и частоте 25106 Гц.

Для оптимизации акустической части акусто-магнитного аппарата проведено моделирование, в котором результирующим признаком выбрана сила Лоренца, устремленная на максимум, а изменяемыми параметрами были частота, длина аппарата, сопротивление обмоток, индуктивность обмоток. Установлено, что максимальная сила Лоренца наблюдается при следующих значениях факторов: длина рабочей области аппарата 5,19 см; подаваемая частота 47540 Гц; ин-

дуктивность обмотки 45 мкГн; сопротивление одной обмотки 73,26 Ом.

Было проведено моделирование зависимости температуры поверхности аппарата от длины рабочей области аппарата. Значение температуры рассматривалось при максимальном и минимальном значениях. Установлено, что температура поверхности акусто-магнитного аппарата составляет 35,84 °С и не зависит от длины рабочей области аппарата.

3.7 Расчет элементов и устройств системы автоматизации акусто-магнитного аппарата

Исходя из требований к автоматической системе безреагентной обработки жидкости, выдвинутые в первой главе, сформируем список элементов для этой системы: акусто-магнитные аппараты (АМА) для безреагентной обработки жидкости; два псевдотрехфазных генератора (трехфазных инвертора) для создания переменного магнитного поля в АМА (основной и запасной); датчики температуры АМА; датчик тока обмоток АМА; датчик скорости потока жидкости; блок питания на 5В, 14В и 24В; коммутационные элементы; шаровые электроприводы; микроконтроллер; контроллер. На основе выбранных элементов разработана структурная (рис.3.25) и функциональная (рис.3.26) схемы.

Технические характеристики:

- мощность электродвигателя не более 6 Вт;
- максимальное давление жидкости 12 атмосфер;
- максимальная температура жидкости +78 °С;
- температурный диапазон эксплуатации от -10 °С до +60 °С;
- габаритные размеры электропривода (без крана) (ширина;высота;длина) (70;65;70), мм;
- длина соединительного кабеля 1,1 м;
- время поворота шарового крана на 90° за 15 секунд;
- напряжение питания от 14В.

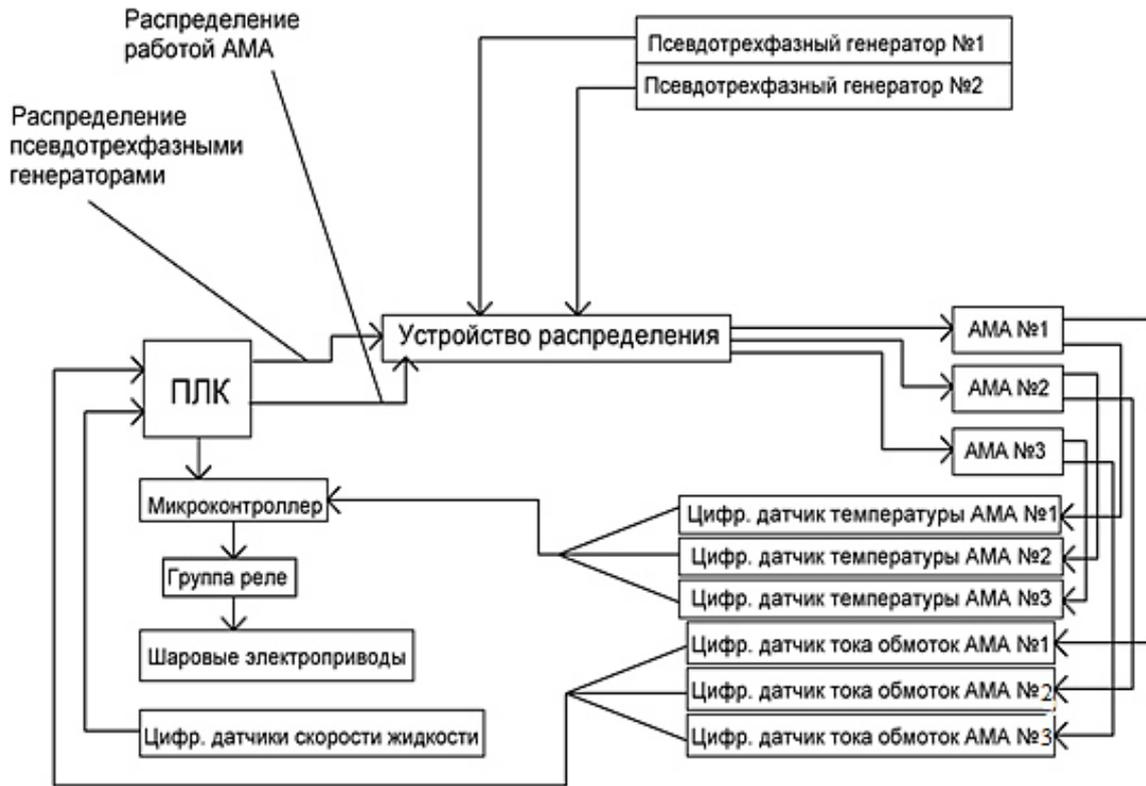


Рисунок 3.25 – Структурная схема САУ безреагентной обработкой жидкости

Исходя из требований, выдвинутых к системе автоматического управления (САУ) безреагентной обработкой геотермальной воды были выбраны элементы и устройства для реализации самой системы.

Сигналы от датчиков температуры с АМА поступают на микроконтроллер, а от датчиков тока в обмотках АМА на ПЛК. Микроконтроллер воздействует на группу исполнительных механизмов системы (шаровые электроприводы) с помощью реле и усилительных транзисторов. ПЛК управляет переключением между двумя трехфазными инверторами через реле, а также работой трёх аппаратов акусто-магнитной обработки жидкости.

Система автоматической безреагентной обработки геотермальной воды для системы отопления гидропонных теплиц должна препятствовать накипеобразованию на трубах и теплообменнике, тем самым обеспечить более долгую работу системы геотермального отопления.

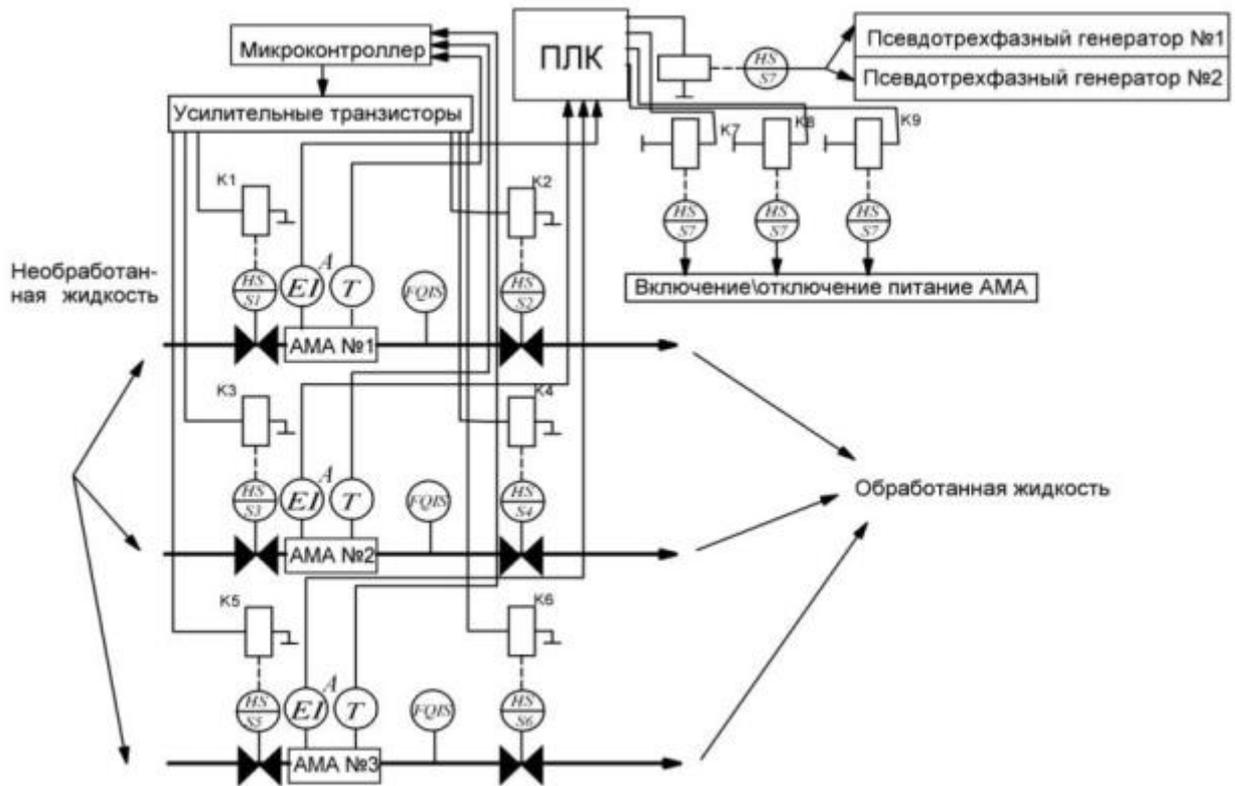


Рисунок 3.26 – Функциональная схема САУ тремя акусто-магнитными аппаратами, установленными параллельно подающей трубе

В соответствии с особенностями технологии, оборудования и поставленными задачами управления безреагентной обработкой геотермальной воды и на основе общих принципов построения современных систем автоматического управления создаваемая система автоматического управления безреагентной обработки должна удовлетворять следующим требованиям:

- вести постоянный контроль над технологическим процессом;
- потреблять малое количество энергии;
- быть надежной;
- иметь низкую стоимость;
- содержать минимально возможное количество элементов в системе;
- быть простой в реализации;
- иметь малые габариты.

В системе автоматического управления аппаратом приняты меры по обеспечению оборудования системы бесперебойным питанием. Предусмотрено два

независимых ввода напряжения питания 220В, 50Гц.

Питание контроллера и трёхфазного инвертора осуществляется через источник бесперебойного питания 220 В, 50 Гц, обеспечивающего непрерывное питание от собственных батарей при сбоях в сети электроснабжения. Контроллеры и модули ввода/вывода питаются от источника питания 24 В, установленного в шкафу автоматики.

Для питания остальных устройств был использован блок питания, который преобразовывает переменное напряжение 220В в постоянное 5В. Блок питания питает цифровые датчики, трехфазный инвертор и микроконтроллер КР1878ВЕ1.

Трёхфазный инвертор выдает импульсы на каждую из фаз АМА. Цифровые датчики температуры и тока сигнализируют о температуре корпуса и наличии тока в обмотках в АМА. Датчик скорости потока жидкости позволяет следить за скоростью геотермальной воды.

При повышении температуры контроллер подает сигнал управления на микроконтроллер, тот, в свою очередь, управляет степенью открытия шарового электропривода. При превышении силой общего тока в цепи предельно допустимого значения или при отсутствии тока в акусто-магнитном аппарате происходит отключение или смена трехфазного инвертора соответственно.

Выбор элементной базы и стандартных элементов. Главное качество, по которому следует проводить выбор контроллера, – это быстродействие. Кроме этого, контроллер должен быть компактным, иметь относительно невысокую стоимость, цифровые входы и выходы, источник питания 24В.

Контроллер ОВЕН ПЛК150-24.А-М (представлен на рисунке 3.27) имеет преимущества:

- компактный корпус с креплением на DIN-рейке;
- дискретные и аналоговые входы/выходы с возможностью расширения их количества путем подключения внешних модулей ввода/вывода по любому из встроенных интерфейсов;
- частота, подаваемая на дискретные входы до 10 КГц при использовании подмодулей счетчика;

- интерфейсы: Ethernet; RS-485; RS-232 Debug; RS-232; USB Device;
- программирование в системе CODESYS V2.3 через порты USB Device, Ethernet, RS-232 Debug;
- контроллер поддерживает работу с нестандартными протоколами по любому из интерфейсов, что позволяет подключать такие устройства как электро-, газо-, водосчетчики, считыватели штрих-кодов и т.п.;
- встроенный аккумулятор, позволяющий «пережить» перебои питания, выполнение программы при перебоях питания и перевод выходных элементов в «безопасное состояние»;
- встроенные часы реального времени.



Рисунок 3.27 – Контроллер ОВЕН ПЛК150-24.А-М

Требования к датчикам системы. Цифровые датчики температуры и тока сигнализируют о температуре корпуса и наличии тока в обмотках акусто-магнитного аппарата. Датчик накипеобразования позволяет следить за количеством образовавшейся накипи и подавать сигнал для изменения параметров акусто-магнитной обработки жидкости. При превышении предельно допустимого значения силы общего тока в цепи или при отсутствии тока в акусто-магнитном аппарате, происходит отключение или смена трехфазного инвертора соответственно. Датчик температуры должен соответствовать следующим требованиям: диапазон измеряемой температуры $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+99\text{ }^{\circ}\text{C}$; погрешность измерений $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в диапазоне от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$); напряжение питания 5 В.

В ходе проектирования системы было рассмотрено несколько способов из-

мерения температуры. Первый основан на использовании терморезистора или термопары, протекающий ток которых пропорционален величине температуры. Для оцифровки данного сигнала нужен дополнительный аналогово-цифровой преобразователь.

Полученный результат нужно еще масштабировать в соответствии со шкалой Цельсия. Наибольшая сложность состоит в том, что зависимость измеренной величины от температуры могла бы получиться непрямолинейной, кроме того, было необходимо реализовать устройство передачи данных от АЦП микроконтроллеру.

В системе было решено использовать датчик температуры DS18B20. На рисунке 3.28 представлен внешний вид датчика температуры. Данный датчик хорошо согласуется с микроконтроллером КР1878ВЕ1. На рисунке 3.29 представлен внешний вид микроконтроллера КР1878ВЕ1.

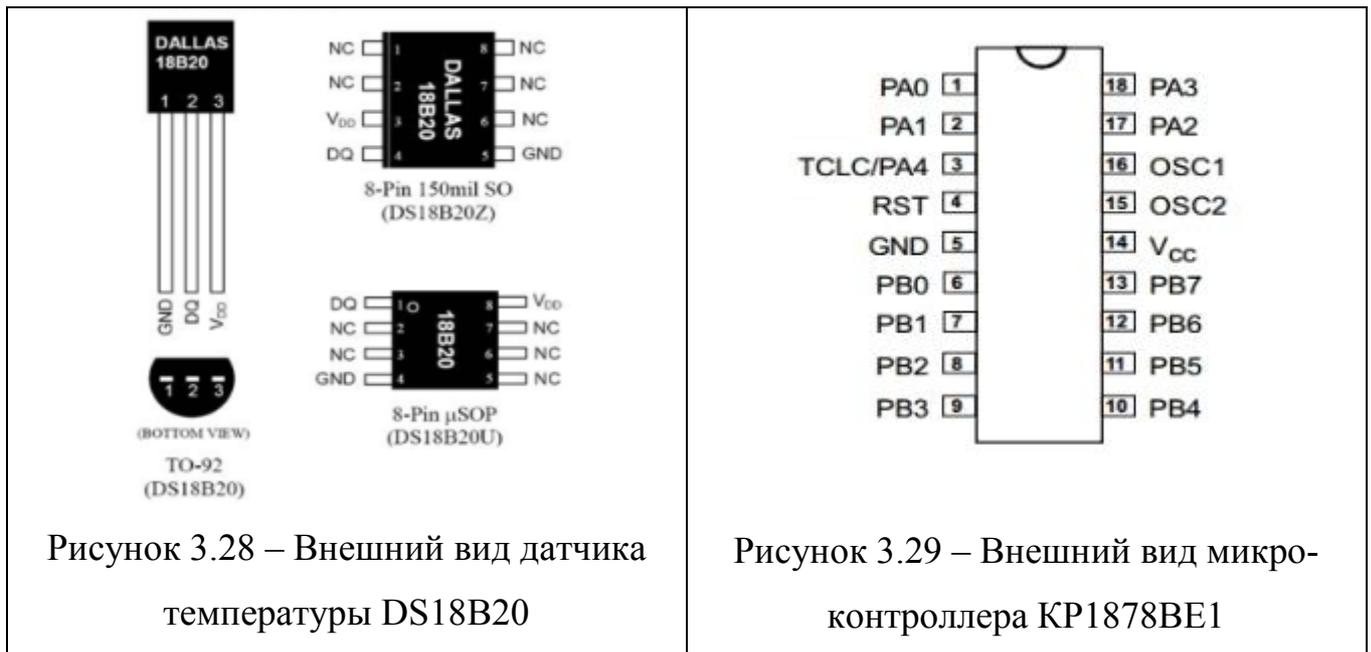


Рисунок 3.28 – Внешний вид датчика температуры DS18B20

Рисунок 3.29 – Внешний вид микроконтроллера КР1878ВЕ1

Требования к микроконтроллеру. Причины выбора микроконтроллера КР1878ВЕ1: минимальный ток потребления, высокая надежность, невысокая стоимость по сравнению с аналогами.

Технические характеристики микроконтроллера:

- ППЗУ команд – 1К x 16 бит;

- ОЗУ данных – 128 x 8 бит;
- ЭСППЗУ данных – 64 x 8 бит;
- система команд – 52 команды;
- тактовая частота – 32 кГц ... 8 МГц;
- время выполнения любой команды – 2 такта (250 нс при частоте 8 МГц);
- наличие режимов: начальный пуск, системная ошибка, сторожевой таймер, порт А, порт В, таймер, конец записи в ЭСППЗУ;
- время реакции на прерывание – 3 такта;
- 12 (13) линий ввода/вывода с индивидуальным управлением, направлением и прерыванием от любой линии;
- максимальный ток 25 мА;
- 16-разрядный таймер с 8-разрядным делителем частоты;
- сторожевой таймер с автономным генератором;
- напряжение питания 4,0–6,0 В;
- потребляемая сила тока < 2 мА при VCC = 5 В и f = 5 МГц; 50 мкА при VCC = 5 В и f = 32 кГц, < 1 мкА в режиме STOP.

Датчик скорости потока жидкости позволяет следить за скоростью геотермальной воды. Допустима установка датчика скорости потока жидкости WA-100 или похожих, в зависимости от свойств теплотехнической системы. На рисунке 3.30 представлен внешний вид датчика скорости потока жидкости WA-100.



Рисунок 3.30 – Датчик скорости потока жидкости WA-100

Датчик подключается к магистрали 3/8" или 1/4", скорость потока воды до

10л/мин, температура рабочей среды до 100 С°, чувствительный элемент геркон SW---NO 0.5A 100Vdc/Vac Paddle SUS304, количество срабатываний 50 тыс, провод POM /UL 24 AWG, 30см.

Требования к датчику тока следующие: датчик тока должен иметь цифровой выход, простую конструкцию, малые габариты, максимальная сила тока 5А, напряжение питания 5В. Этим требованиям соответствует датчик тока GY-712 (рисунок 3.31). Выход подключается к аналоговому входу микроконтроллера, измеряется поступившее напряжение из расчета 66 мВ на 1 А (то есть, например, если на входе 132мВ, то протекающий ток 2А). В зависимости от включения может измерять от 0 до 5А.

Требования к электроприводу заслонки следующие: электропривод должен обеспечивать управление скоростью потока жидкости и давлением на выходе системы, а также иметь небольшое электропотребление. При повышении температуры контроллер подает сигнал управления на микроконтроллер, тот, в свою очередь, управляет степенью открытия шарового электропривода. Лучшим выбором является шаровой электропривод GIDROLOCK ULTIMATE. На рисунке 3.32 представлен внешний вид шарового электропривода.

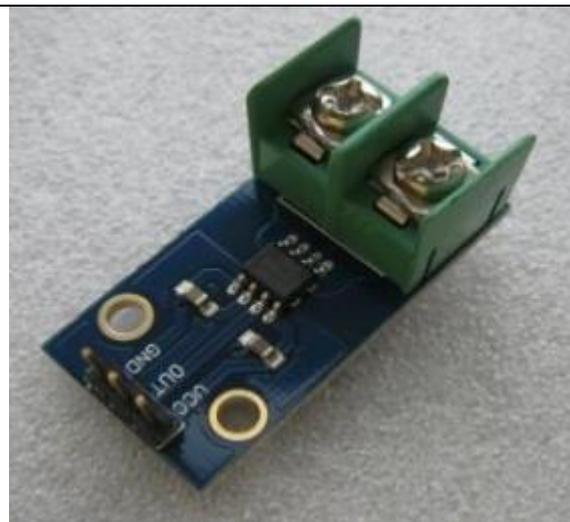


Рисунок 3.31 – Внешний вид датчика тока GY-712



Рисунок 3.32 – Внешний вид шарового электропривода GIDROLOCK ULTIMATE

Моторизованный шаровой кран применим для автоматизации управления

током воды в контурах отопления и водопроводах малоэтажных домов, дачных бассейнах и водонакопителях, системах автополива и защиты от протечек. В основе устройства — латунный шаровой кран для труб диаметром 1/2 дюйма. Он выдерживает давление до десяти атмосфер и температуру воды до 100°C. За поворот хромированной шаровой заслонки отвечает моторный блок. Он рассчитан на работу с напряжением 12 В имеет встроенные концевые выключатели.

Характеристики: номинальное напряжение питания 9-12 В; потребляемая мощность в момент движения заслонки 5 Вт; потребляемая мощность в покое 0 Вт; время полного открытия или закрытия 3 с; материал корпуса: латунь; рабочее давление не более 1 МПа (10 Атм); диаметр подводки 1/2 дюйма; температура жидкости не более 100 °С; габариты клапана 90x70x70 мм.

Требования к датчику накипеобразования: датчик должен иметь цифровой выход, простую конструкцию, малые габариты. Этим требованиям соответствует датчик скорости потока жидкости G1/2" Water Flow Sensor Enclosure.

При прохождении воды через ротор, он начинает вращаться. Скорость его вращения изменяется в зависимости от потока воды. Датчик Холла выдает соответствующий импульсный сигнал. На рисунке 3.33 представлен датчик накипеобразования.



Рисунок 3.33 – Датчик накипеобразования

Технические характеристики датчика: рабочее напряжение 5В-24В; максимальная сила тока 15мА (при 5В); диапазон расхода потока от 1 до 30 л /мин;

рабочая температура $0^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$; температура жидкости до 120°C ; влажность $35\% \div 90\%$; рабочее давление до $1,75\text{МПа}$.

Требования для трехфазного инвертора следующие. Использование трехфазного генератора для создания переменного синусоидального магнитного поля в акусто-магнитном аппарате не рациональна для сельскохозяйственных предприятий Республики Адыгея, т.к. такие генераторы являются дорогостоящими и потребляют большое количество энергии.

Одним из решений данной проблемы является использование трехфазного инвертора, формирующего на выходе прямоугольные импульсы напряжения. Схемных решений таких инверторов много, и они могут быть выполнены на различной элементной базе. Одним из схемных решений такого инвертора является трехфазный инвертор, который предложен М. Мухиным (город Клин, Московской области). Генератор-формирователь (Приложение А. Рисунок А.8) обеспечивает необходимую коммутацию тока в обмотках акусто-магнитного аппарата.

На элементах DD1.1-DD1.3 собран генератор тактовых импульсов, следующих с частотой f_T . На рисунке 3.34 представлена временная диаграмма импульсов, снятая в точках, обозначенных на принципиальной схеме.

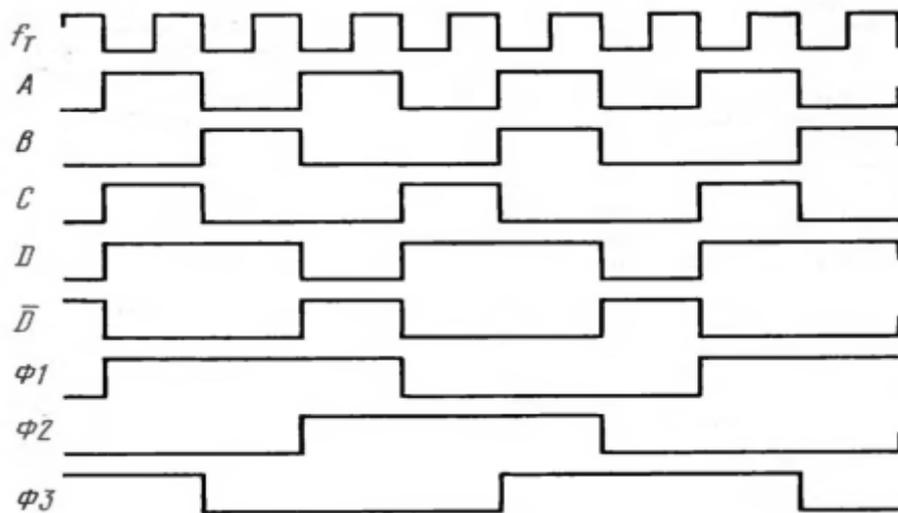


Рисунок 3.34 – Временная диаграмма импульсов, снятая в точках, обозначенных на принципиальной схеме

Трехфазный генератор питают от двух источников: стабилизированного

напряжением 5 В (потребляемый ток 65...70 мА) и нестабилизированного напряжением 14 В (ток потребления до 0,6 А).

Для сельскохозяйственных предприятий других регионов можно рекомендовать трёхфазные инверторы промышленного производства. Трёхфазный инвертор должен иметь следующие технические характеристики:

- номинальное входное напряжение сети 220 В;
- диапазон изменения напряжения сети (-20...+20)%;
- КПД 92...95%;
- количество фаз 3 или 1;
- точность сдвига фаз не более 1%;
- диапазон регулирования частота тока от 10 кГц до 47 кГц;
- номинальное выходное напряжение от 14 В до 127 В;
- выходная мощность 1 кВА;
- диапазон регулирования выходного напряжения (-5...+5)%;
- форма выходного напряжения меандр;
- интерфейсы связи с АСУТП Ethernet, RS485, GSM, (оптоволоконно/медь);
- коэффициент нелинейного искажения выходного напряжения не более 5%.

Для одной геотермальной скважины необходимо устанавливать отдельный трёхфазный инвертор. Задаваемая частота инвертора зависит от резонансной частоты ферритового кольца и может задаваться посредством создания обратной связи инвертора по частоте.

Типовая принципиальная схема трёхфазного инвертора представлена на рисунке А.6 (Приложение А). Для обеспечения оптимальной надёжности необходимо иметь один резервный инвертор.

Требования к системе бесперебойного питания. В системе автоматического управления безреагентной обработкой воды должны быть приняты меры по обеспечению оборудования системой бесперебойного питания. Необходимо предусмотреть два независимых ввода напряжения питания 220В, 50Гц. Питание контроллера и псевдотрёхфазного генератора осуществляется через источник беспере-

ребойного питания 220 В, 50 Гц, обеспечивающий непрерывное питание от собственных батарей при сбоях в сети электроснабжения. Контроллеры и модули ввода/вывода имеют источник питания 24 В, установленный в шкафу автоматики. На рисунке 3.35 показан внешний вид источника питания 24В.



Рисунок 3.35 – Компактный источник питания HDR-60-24 на DIN-рейке, соответствующий стандартам UL/TUV/CB/CE

Источник питания HDR на DIN-рейке с ультраузкой формой корпуса и полным диапазоном входного напряжения 100-240 В переменного тока удовлетворяет требованиям стандарта EN6100-3-2, нормы которого регулируют ток гармонических составляющих. Источник питания размещён в пластиковом корпусе и может эффективно защищать пользователя от риска поражения электрическим током. Источник питания NDR может быть смонтирован на DIN-рейке стандарта TS35.

При установке необходимо обеспечить расстояние 5 мм слева и справа, 40 мм сверху и 20 мм снизу вокруг монтируемого устройства во избежание его перегрева, расстояние не менее 10-15 см от любых источников тепла. Целесообразно размещать блок питания для монтажа вертикально, входные клеммы должны быть размещены снизу, а выходные – сверху блока питания. Иные способы ориентации для монтажа, например, в перевернутом виде, горизонтально или настольно, не допускаются.

Для цифровых датчиков, псевдотрехфазного генератора и микроконтроллера KP1878BE1 целесообразно использовать блок питания, преобразующий переменное напряжение 220В в постоянное 5В. Внешний вид источника питания DR-15-5, установленного на рейке, показан на рисунке 3.36.



Рисунок 3.36 – Внешний вид источника питания DR-15-5, установленного на рейке

Источники питания серии DR, второго класса, являются преобразователями напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока с двойной гальванической развязкой, означающей работу без заземления. Как и остальные блоки питания, блоки серии DR могут быть смонтированы на DIN-рейку стандарта TS35.

При установке необходимо обеспечить выполнение правил, указанных для источника питания HDR-60-24. Целесообразно использовать провода только с медным проводником, все жилы каждого многожильного провода должны входить в клеммное соединение, а винты в клеммах должны быть надежно закручены для предотвращения плохого контакта. Для источника питания с несколькими клеммами выхода, каждая клемма должна быть соединена с проводами во избежание превышения выходного тока на одной клемме (контакте), необходимо использовать провода (кабели), изоляция которых выдерживает температуру, по меньшей мере, 80 °С, например UL1007. Рекомендуемая длина зачистки провода для крепежа в клемме 7 мм (0,275"). Рекомендуемое усилие при закручивании клемм 5 кгс/см² (4,4LB-in). Рекомендуется использовать шлицевую отвертку для закручивания клеммных винтов с диаметром 3 мм. Существует риск поражения электрическим током. Все отказы блоков питания должны быть проверены ква-

лифицированным специалистом.

Для обеспечения требования бесперебойности рекомендуется установить комплект бесперебойного питания ТЕРЛОСОМ-600, в состав которого дополнительно входят две аккумуляторные батареи (АКБ). Внешний вид комплекта показан на рисунке 3.37.



Рисунок 3.37 – Внешний вид комплекта бесперебойного питания ТЕРЛОСОМ-600

Источник бесперебойного питания (220 В, 600 ВА (450 Вт)) автоматически осуществляет переход на резервное питание от АКБ при отказе сети, работает от двух АКБ с суммарным напряжением 24 В (возможно использование автомобильных АКБ). Время резерва зависит только от емкости АКБ. АКБ защищена от глубокого разряда, заряд АКБ оптимальный.

Состав блока бесперебойного питания: модуль зануления для корректной работы в режиме резерва; модуль защиты от перегрузки; модуль индикация режимов работы. Источник бесперебойного питания обладает рядом преимуществ: большая мощность подключаемой нагрузки – 450 Вт или 600 ВА; прибор работает с учетом кратковременных больших пусковых токов; неизменная синусоидальная форма сигнала в сетевом и автономных режимах; защита от скачков напряжения и высокочастотных помех; неизменная частота выходного напряжения; способность обеспечить время резервирования до нескольких суток.

После разработки структурной и функциональных схем, разработана принципиальная электрическая схема оборудования (рис.3.38; А.1-А.5). При выборе

источника питания системы оказалось, что в тепличном комплексе «Радуга» уже имеется две аккумуляторные батареи на 14 В, которые при последовательном подключении выдают 24 В. Зарядка батарей производилась посредством компактного источника питания HDR-60-24. От аккумуляторов запитывались реле и ОВЕН ПЛК150-24.А-М., для питания остальных устройств был использован блок питания, который преобразовывал переменное напряжения 220В в постоянные 5В. Блок питания питал цифровые датчики, псевдотрехфазные генераторы и микроконтроллер КР1878ВЕ1.

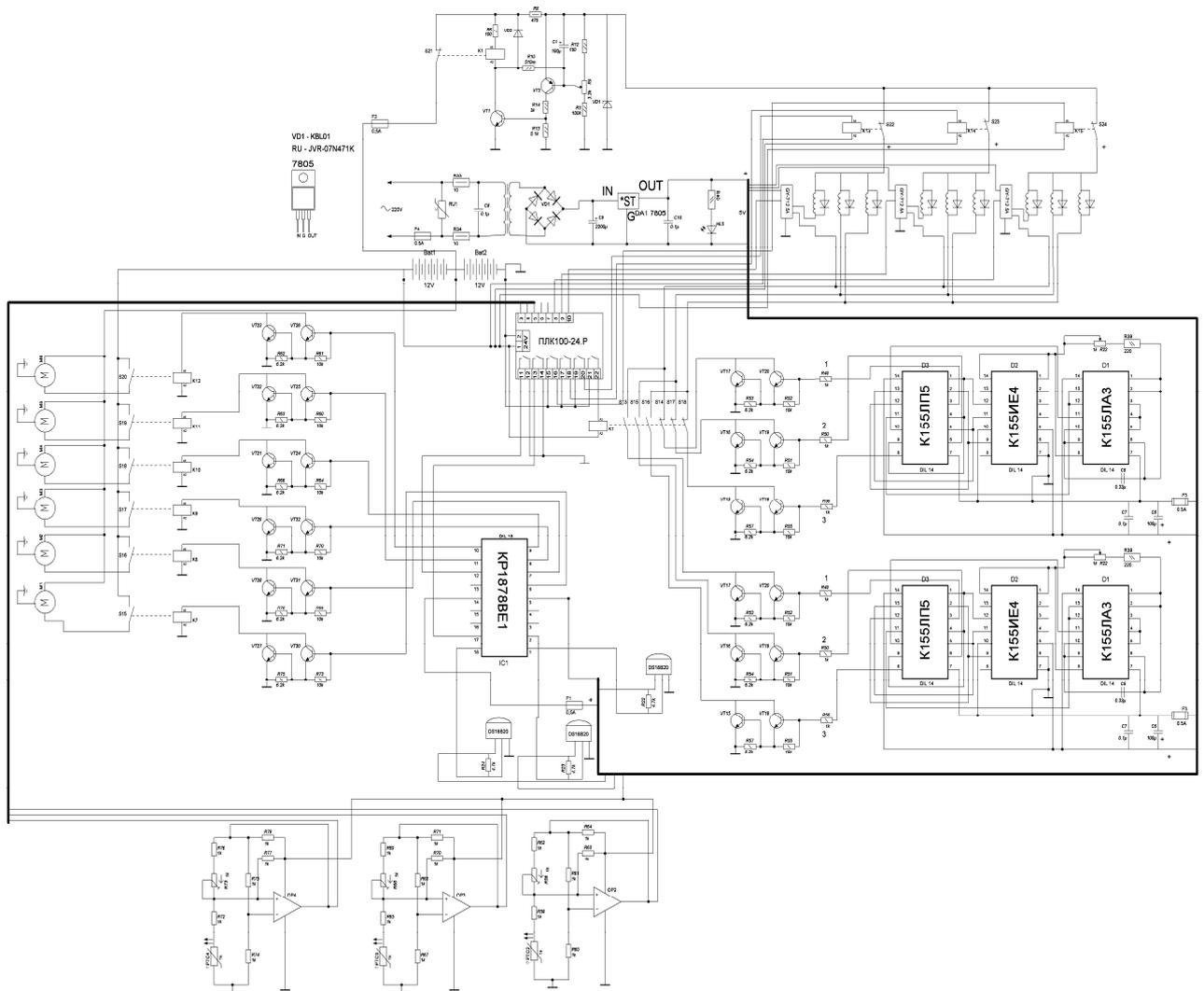


Рисунок 3.38 – Принципиальная электрическая схема оборудования системы автоматизации безреагентной обработки жидкости

Трехфазный инвертор выдает импульсы на каждую из фаз АМА. Цифровые датчики температуры и тока сигнализируют о температуре корпуса и наличии то-

ка в обмотках АМА. Датчик потока жидкости позволяет следить за скоростью движения гидропонного раствора. При повышении температуры контроллер посылает сигнал управления на микроконтроллер, тот, в свою очередь, управляет степенью открытия шарового электропривода. При повышении общего тока, заданного или его отсутствии в АМА, происходит отключение или смена трехфазного инвертора соответственно.

Программное обеспечение контроллера. Управляющая программа выполнена на промышленном контроллере ARIES PLK150 с блоком расширения входов и выходов контроллера, а в качестве объекта управления выступает математическая модель объекта, реализованная в среде CoDeSys. Моделирование системы происходит в режиме реального времени. Основной сложностью синтеза такой системы управления в реальном времени является интерфейс между математической моделью объекта и контроллером. Взаимодействие контроллера с объектом управления осуществляется по сети TCP/IP, используется протокол связи (Frame Oriented) – значения выбираются из списка «ASCII» и «RTU-mode», значение по умолчанию – ASCII.

Для установления соединения CoDeSys с контроллером необходимо определить локальный Gateway Server. Далее определяется канал связи Gateway сервера с устройством. Для этого посредством команды Scan network для поиска доступных данному серверу устройств в локальной сети находим ПЛК, с которым активируем специальный канал связи. Таким образом, можно иметь несколько каналов связи с разными устройствами в одном проекте.

В контроллерах фирмы ОВЕН сервер ввода/вывода на базе технологии OPC DA 2.0 возможно организовать OPC-сервер. Рассмотрим OPC-сервер, организованный в контроллере (рис. 3.39).

Протокол OPCDA 2.0 работает поверх TCP/IP соединения, то есть контроллер и ПК, с установленным на нем пакетом CoDeSys, находятся в одной сети и соединены по Ethernet. В CoDeSys моделируется работа системы безреагентной обработки геотермальной воды посредством акусто-магнитных аппаратов, где входом в систему является геотермальная вода с большим

количеством солей, а на выходе из системы противонакипный эффект, выраженный в массовой доле накипи на стенках теплотехнического оборудования.

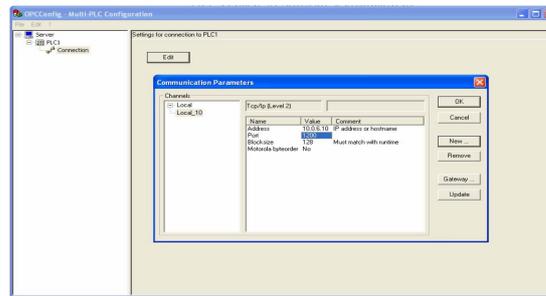


Рисунок 3.39 – PLC Connection

Моделирование в реальном времени начинается с задания установочных параметров системы: скорости потока воды, входной температуры воды, начального угла открытия входной заслонки (рис 3.40).

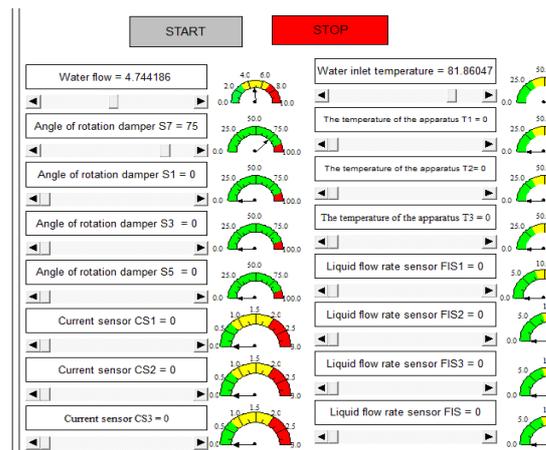


Рисунок 3.40 – Установочные значения задатчиков

После нажатия на кнопку «Старт» происходит открытие входной заслонки, и вода поступает в отопительную систему. Задвижки перед аппаратами S1,S3,S5 закрыты, а задвижки S2,S4,S6 открыты полностью. Контроллер производит опрос датчика накипеобразования, установленного на входе в теплообменник, и в зависимости от показаний открывает заслонки S1,S3,S5. При большом количестве накипи открыты все три заслонки, а при ее уменьшении заслонки последовательно закрываются. Подключение акусто-магнитных аппаратов происходит по-

сле стабилизации потоков воды в трубах, на которых установлены акусто-магнитные аппараты. На рис.3.41 изображено подключение одного акусто-магнитного аппарата, при этом показания датчика накипеобразования минимальны.

Для стабилизации потоков воды в среде CoDeSys была разработана программа управления для ПЛК на основе ПД-регулятора. Реализация ПД-регулятора заимствована из стандартной библиотеки среды разработки CoDeSys и реализована для стабилизации трёх потоков воды в трубах, на которых установлены акусто-магнитные аппараты. Разработанная программа управления представлена на рис. 3.42.

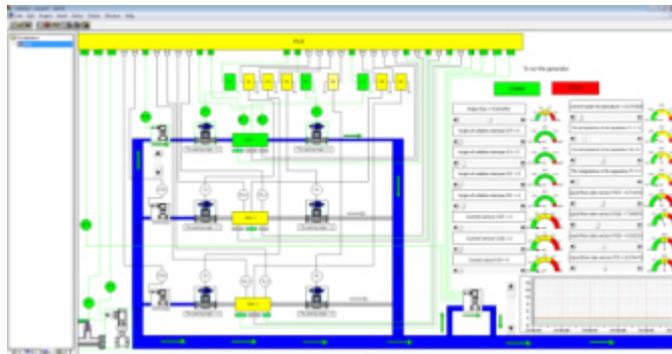


Рисунок 3.41 – Подключение одного акусто-магнитного аппарата

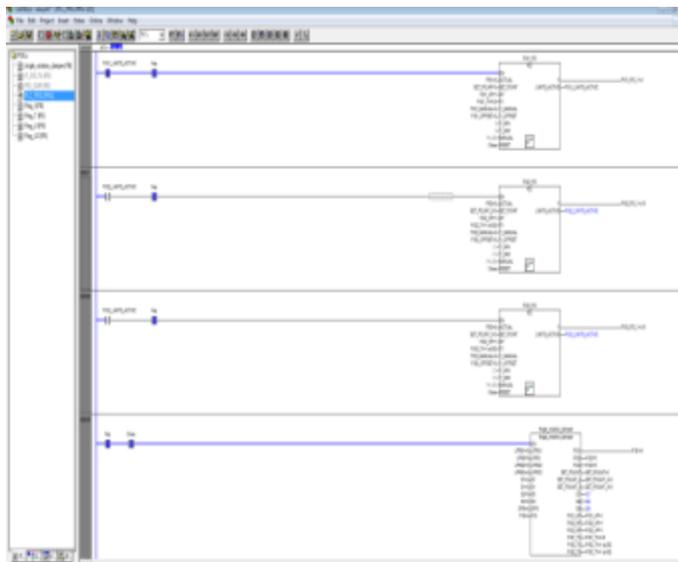


Рисунок 3.42 – Программный код ПД-регуляторов

Моделирование программы управления выполнялось с шагом квантования 0,12 с. Результаты моделирования системы управления (ПД-регулятор) приведены

на рис. 3.43.

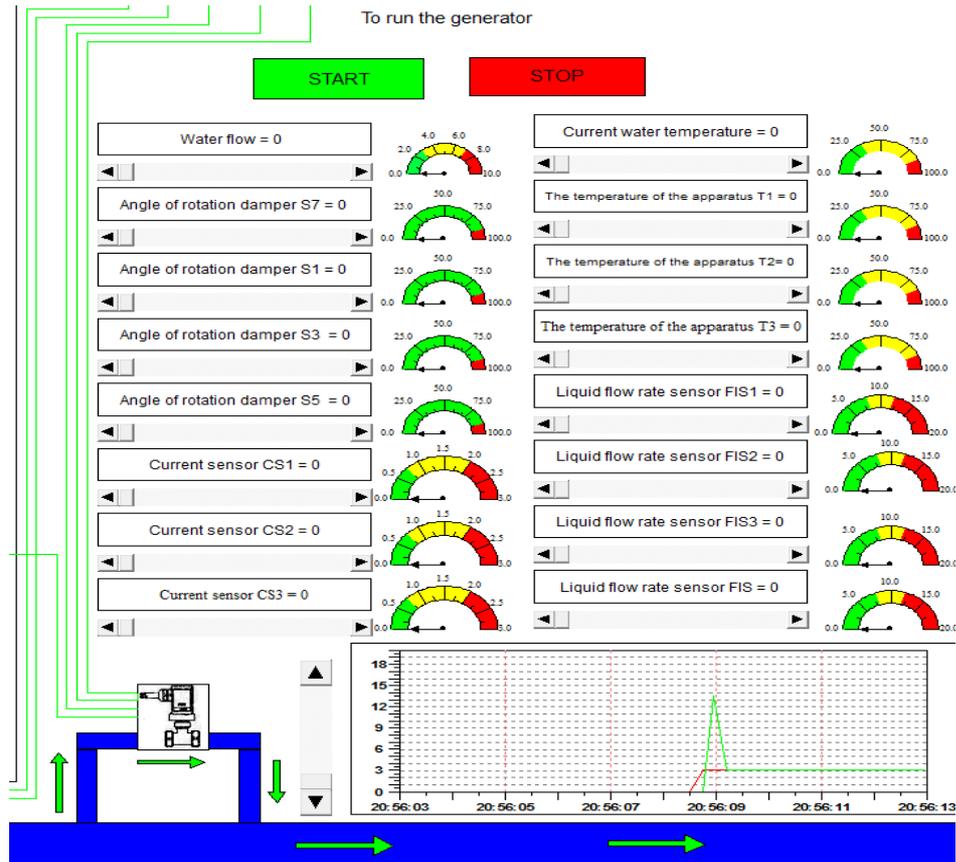


Рисунок 3.43 – Результаты моделирования ПД-регулятора

В режиме online значения всех видимых на экране переменных отображаются CoDeSys в реальном времени.

Актуальные значения переменных можно увидеть в разделах объявлений и кода редакторов, в менеджере рецептов (watch and receipt manager) и на экранах визуализации. Значения переменных экземпляров функциональных блоков отображаются в виде иерархического дерева. Для указателей в разделе кода отображаются только их собственные значения (рис 3.44).

В программе (Приложение Б) предусмотрены аварийные случаи отключения системы акусто-магнитной обработки воды. Так, при превышении заданного значения тока, которое снимается с датчиков тока, установленных на всех аппаратах, происходит автоматическое снятие питания со всех аппаратов и закрытие заслонок, стоящих перед акусто-магнитными аппаратами.

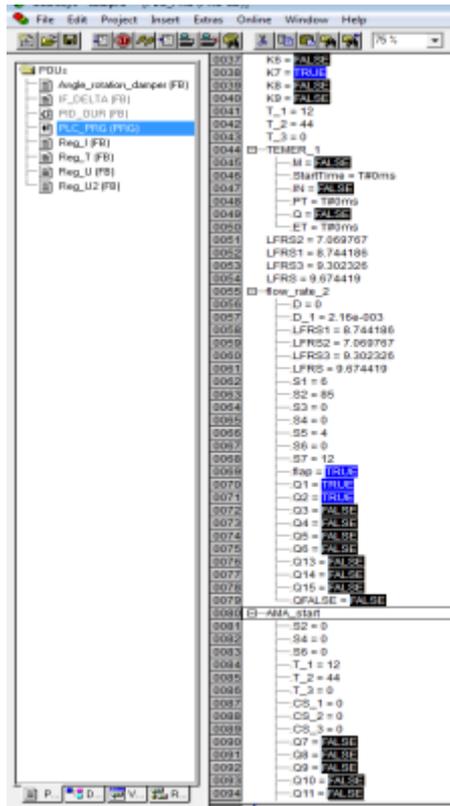


Рисунок 3.44 – Отображение переменных в Online-режиме

Отключение акусто-магнитных аппаратов также происходит при превышении установленных показаний датчиков температуры, установленных на каждом акусто-магнитном аппарате. На рисунке 3.45 показан режим аварийной остановки системы.

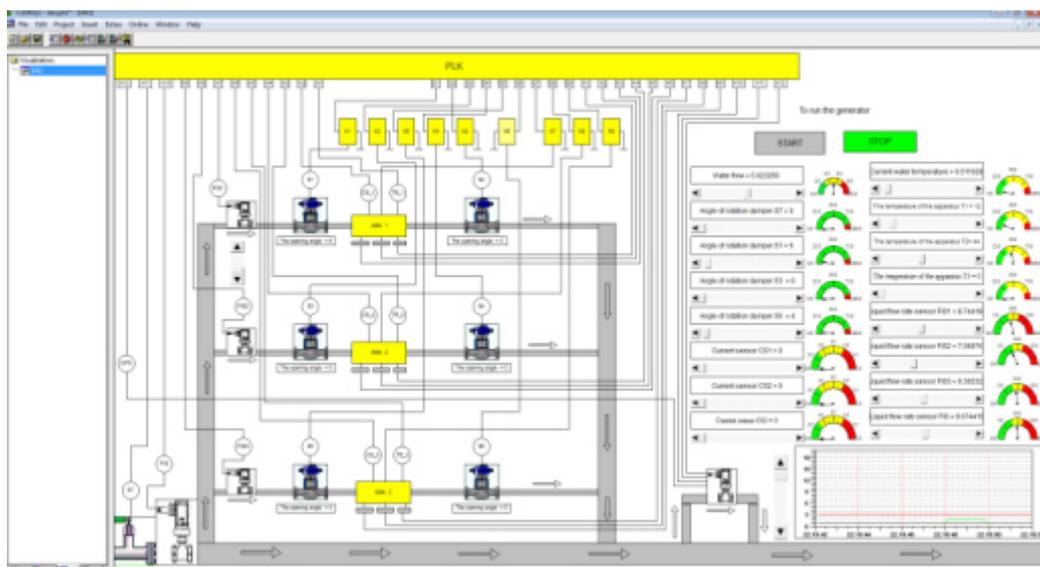


Рисунок 3.45 – Аварийная остановка системы

Представленный подход позволяет одновременно генерировать визуализацию, компилировать программу и загружать её в контроллер. Пользователь может просматривать и корректировать полученный код при необходимости. Такой подход позволяет перейти от рутинного программирования к модульному проектированию прикладных проектов [12].

Надежность разработанной системы рассчитывалась с помощью статистической модели Миллса:

$$\Upsilon = \frac{\zeta\phi}{\varrho} \quad (3.73)$$

где Υ – первоначальное число ошибок в системе; ζ – количество искусственно внесенных ошибок; ϕ – количество найденных собственных ошибок; ϱ – количество обнаруженных к моменту оценки искусственных ошибок.

После тестирования подсистем была сформирована таблица с результатами. В таблице 3.2 отражены данные результатам расчётов количества ошибок системы перед началом каждого теста с учетом, что предыдущие ошибки уже были выявлены и отлажены.

Таблица 3.2 Данные по результатам расчётов количества ошибок

№ опыта	ζ	ϕ	ϱ	Υ
1	36	11	26	15
2	27	10	15	18
3	18	9	11	14
4	11	8	8	11
5	7	6	4	10
6	3	2	2	3

В результате тестирования постепенно уменьшается первоначальное количество ошибок в системе (N) от 15 до 3, уменьшается число выявленных собственных ошибок, сумма всех выявленных в процессе отладки системы ошибок равна первоначальному количеству ошибок в системе. Первоначальное число ошибок в системе 46.

3.8 Выводы

1. Разработаны новые безреагентные способы обработки жидкости в тепличном производстве, новизна которых защищена патентами РФ № №2654334, 2641822. Получены функциональные, структурные схемы электротехнологических процессов, принципиальные электрические схемы отдельных узлов, а также конструктивные решения электротехнологического оборудования.
2. Обоснованы основные параметры и расчетные формулы для определения значений параметров магнитострикционного преобразователя: чувствительности, коэффициента эффективности, сопротивления механических потерь, допустимой амплитуды колебаний, резонансной частоты, номинальной электрической мощности, электромеханического КПД, добротности, входного сопротивления.
3. При разработке электромеханического преобразователя нужно использовать материал с малым температурным изменением коэрцитивной силы и коэффициента прямоугольности симметричной петли гистерезиса, а знаки этих изменений должны быть противоположными, чтобы влияние температурных изменений этих параметров на температурное изменение проницаемости μ_{Δ} взаимно компенсировалось.
4. Температурные изменения параметров сердечников аппарата нелинейно меняются с изменением приложенного поля или перепада индукции. При перепадах индукции, близких к индукции насыщения на участке, где крутизна зависимости $\Delta B_{ст}(H_{ст})$ мала, температурное изменение поля $H_{ст}$ при $+100^{\circ}\text{C}$, как правило, резко увеличивается.
5. Температурные изменения $\mu_{\Delta}(H_{ст})$, $\mu_{\Delta}(\Delta B_{ст})$ и $H_{ст}(\Delta B_{ст})$ имеют противоположные абсолютные величины ввиду нелинейности этих характеристик. Таким образом, параметры ΔB_0 и H_0 могут характеризовать предельный режим работы сердечника аппарата, при котором влияние насыщения сердечника сказывается незначительно на параметрах акусто-магнитного аппарата.

6. Получена зависимость среднего квадрата напряженности магнитного поля в рабочей зоне акусто-магнитного аппарата от частоты и длины этой рабочей зоны. Максимальное значение напряженности составило 18,48 А/м, что соответствует длине рабочей зоны аппарата 6,99 см и частоте 25106 Гц.
7. Проведено моделирование в среде ELCUT, в результате которого создана геометрическая модель объекта исследований; заданы его свойства; проведено моделирование трёх видов импульсных напряжений и установлена лучшая форма – 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.
8. Математическая обработка результатов моделирования с оптимизацией максимума по силе 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.
9. Математическая обработка результатов моделирования показала, что параметры акусто-магнитных аппаратов для предотвращения накипеобразования на внутренних поверхностях теплотехнического оборудования должны быть следующими: при производительности по воде 1,91 м³/ч, резонансная частота 47348 Гц, номинальная электрическая мощность 6,19 Вт, электромеханический КПД 0,75, добротность 0,012, полное входное сопротивление 220 Ом.
10. Проведено моделирование в реальном времени с заданием установочных параметров системы: скорость потока воды 1 м/с, входной температуры воды 78,9 °С, начального угла открытия входной заслонки 90°.
11. Моделирование изменения температуры поверхности аппарата в зависимости от длины рабочей области показало, что температура поверхности акусто-магнитного аппарата составляет 35,84 °С и не зависит от длины его рабочей

области.

12. Разработаны структурная, функциональная и принципиальная схемы системы автоматического управления техническим процессом обработки воды и обоснованы параметры составляющего оборудования: максимальное давление жидкости в системе – 12 атм; мощность электродвигателя привода заслонки – не более 6 Вт; время поворота шарового крана на 90° – 15 с; максимальная температура жидкости $+78^\circ\text{C}$; питание контроллера постоянным током 24В, псевдотрёхфазного генератора – 14В через ИБП 220 В, 50 Гц.
13. Основное оборудование включает микроконтроллер КР1878ВЕ1, термодатчик DS1820, датчик скорости потока жидкости WA-100, шаровой электропривод GIDROLOCK ULTIMATE. Программирование велось на промышленном контроллере ОВЕН ПЛК150 с блоком расширения входов и выходов, в качестве объекта управления выступает 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 0,85.

4 МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Разработка общей методики выбора параметров моделей подобных аппаратов и модернизация методики планирования экспериментов с использованием критериев подобия

Применение методов планирования эксперимента в практике инженерных исследований может быть облегчено и расширено, если учитываются цели, которые ставятся при планировании эксперимента. Задачи, которые решаются с помощью методов планирования эксперимента, во многом совпадают с задачами, разрешаемыми методами теории подобия и моделирования. Именно теория подобия ставит своей задачей так обобщить опытные данные, чтобы любой единичный эксперимент, проведенный на какой-либо модели, мог бы быть закономерно перенесён на неограниченно большой класс явлений, которые в соответствии с критериями, вытекающими из теории подобия, признаются подобными данному явлению.

Синтез теоретических наук и экспериментальных методов позволяет объединить методы теории подобия и моделирования с методологией планирования экспериментов и проводить их как экстремальные. Для решения экстремальных задач общая схема планирования экспериментов состоит из этапов: постановка задачи, выбор факторов, выбор параметров оптимизации, составление линейного плана и построение линейной модели, поиск области экстремума, описание области экстремума, интерпретация результатов [38].

Рассмотрим применение экспериментально-статистических методов при одновременном применении теории подобия для изучения процесса акусто-магнитного воздействия на жидкости [38].

Если процессы, протекающие в акусто-магнитном аппарате, обозначить как P_1, \dots, P_m , то можно функционирование аппарата представить в виде следующей зависимости:

$$f(P_1, P_2, \dots, P_k, \dots, P_s, \dots, P_m) = 0. \quad (4.1)$$

Один из параметров этой зависимости может представлять собой целевую функцию процесса. Определение критериев подобия процесса происходит по методике, представленной выше. Характеристика процесса, связывающего противонакипный показатель с протекающими процессами в акусто-магнитном поле:

$$\pi'_{\xi_{\text{pp}}} = f_1(\pi'_2, \pi'_3, \dots, \pi'_{m-k}). \quad (4.2)$$

Величина $\pi'_{\xi_{\text{pp}}}$ является целевой функцией, при отыскании которой теория подобия позволяет сократить число переменных с m размерных величин до $m-k$ безразмерных. Применяя методы факторного планирования эксперимента, получим критериальное уравнение регрессии вида

$$\pi'_{\xi_{\text{pp}}} = f_1(\pi'_2, \pi'_3, \dots, \pi'_{m-k}) = \beta_0 + \sum_{i=2}^{m-k} \beta_i \pi_i + \sum_{\substack{i \neq j \\ j=2}}^{m-k} \beta_{ij} \pi_i \pi_j + \sum_{i=2}^{m-k} \beta_{ii} \pi_i^2 + \dots, \quad (4.3)$$

где m – общее число изучаемых параметров; k – число независимых параметров.

Особенность применения данного метода заключается в том, что исследователь имеет дело не с отдельными факторами ($x_{10}, x_{20}, \dots, x_{i0}, \dots, x_{k0}$), как обычно, а с обобщенными.

В классическом виде выбор основных факторов и их уровней происходит следующим образом. В качестве факторов выбираются только контролируемые и управляемые переменные (которые исследователь может поддерживать постоянными в течение каждого опыта на заданном уровне). В число факторов включаются параметры процесса, оказывающие сильное влияние на функцию отклика. Условие, при котором применяется этот подход, – это управляемость процессов по каждому из выбранных факторов, т.е. возможность независимого изменения каждого из этих факторов и поддержания его на заданном уровне в период проведения опытов. Для каждого фактора указывается тот интервал изменения параметров, в пределах которого ставится исследование. На основе априорной информации устанавливаются ориентировочные значения факторов. Данная комбинация значений факторов соответствует точке в многомерном факторном пространстве, которая принимается за исходную. Координаты этой точки принимаются за

основной уровень. Согласно теории планирования экспериментов минимально необходимое число уровней факторов на единицу больше порядка уравнения. В качестве факторов можно выбирать только контролируемые и управляемые переменные [144].

Применение данного подхода к исследованию критериальных соотношений несколько усложняется. Это связано с тем, что нельзя задавать шаг варьирования критериями подобия независимо от шага варьирования факторов, входящих в эти критерии. Используются два подхода: 1) многократное моделирование случайным образом факторов процесса в заданных пределах варьирования, и для каждой случайной реализации вычисляется значения критериев подобия, потом определяется шаг варьирования критериев подобия; 2) задаётся шаг варьирования факторов процесса и определяется значение шага варьирования критериев подобия.

Согласно методам планирования эксперимента производится выбор необходимого плана эксперимента и составляется матрица планирования эксперимента для одной из серий опытов (таблица 4.1). Матрица отличается от обычной тем, что в ней указываются не только значения критериев подобия, но и значения параметров, соответствующих данному численному значению. Шаг отклонения критериев подобия задаётся с помощью вариации параметров, входящих в них.

Таблица 4.1 Результативные и факторные признаки для линейной модели

Результативный признак $\xi_{рп}$	P_0	π'_1		π'_2		π'_3		π'_4		π'_5		π'_6		...		π'_k	
		P_{11}	P_{12}	P_{21}	P_{22}	P_{31}	P_{32}	P_{41}	P_{42}	P_{51}	P_{52}	P_{61}	P_{62}	...	...	P_{k1}	P_{k2}
$\xi_{рп1}$	π'_{01} (+)	$\pi'_{11}(-)$		$\pi'_{21}(-)$		$\pi'_{31}(-)$		$\pi'_{41}(+)$		$\pi'_{51}(+)$		$\pi'_{61}(+)$		...		π'_{k1}	
$\xi_{рп2}$	π'_{02} (+)	$\pi'_{12}(+)$		$\pi'_{22}(-)$		$\pi'_{32}(-)$		$\pi'_{42}(-)$		$\pi'_{52}(+)$		$\pi'_{62}(+)$		...		π'_{k2}	
$\xi_{рп3}$	π'_{03} (+)	$\pi'_{13}(-)$		$\pi'_{23}(+)$		$\pi'_{33}(-)$		$\pi'_{43}(-)$		$\pi'_{53}(+)$		$\pi'_{63}(-)$		...		π'_{k3}	
$\xi_{рп4}$	π'_{04} (+)	$\pi'_{14}(+)$		$\pi'_{24}(+)$		$\pi'_{34}(-)$		$\pi'_{44}(+)$		$\pi'_{54}(-)$		$\pi'_{64}(-)$		...		π'_{k4}	
$\xi_{рп5}$	π'_{05} (+)	$\pi'_{15}(-)$		$\pi'_{25}(-)$		$\pi'_{35}(+)$		$\pi'_{45}(+)$		$\pi'_{55}(-)$		$\pi'_{65}(-)$		...		π'_{k5}	
$\xi_{рп6}$	π'_{06} (+)	$\pi'_{16}(+)$		$\pi'_{26}(-)$		$\pi'_{36}(+)$		$\pi'_{46}(-)$		$\pi'_{56}(+)$		$\pi'_{66}(-)$		...		π'_{k6}	
...	
$\xi_{рпn}$	π'_{0n}	π'_{1n}		π'_{2n}		π'_{3n}		π'_{4n}		π'_{5n}		π'_{6n}		...		π'_{kn}	

В соответствии с матрицей планирования проводятся все опыты (расчеты) и определяется критериальное уравнение регрессии в виде

$$\pi'_{\xi_{\text{рп}}} = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i \pi'_i + \sum_{\substack{i \neq j \\ j=1}}^m \beta_{ij} \pi'_i \pi'_j + \dots, \quad (4.15)$$

Сначала выполняется статистический анализ, включающий отсеивание грубых ошибок, проверку однородности дисперсии опытов и определение дисперсии воспроизводимости эксперимента, а затем происходит оценка коэффициентов регрессии.

После расчета коэффициентов регрессии следует проверить их статистическую значимость. Проверка значимости коэффициентов выполняется по критерию Стьюдента. Предварительно определяется дисперсия воспроизводимости. Далее находится дисперсия коэффициентов уравнения регрессии

$$S_{\beta}^2 = \frac{S_{\text{восп.}}^2}{n \cdot m^*}, \quad S_{\beta} = \sqrt{S_{\beta}^2}. \quad (4.16)$$

Коэффициент значим, если выполняется условие:

$$|\beta_i| \geq \Delta \beta_i = t_{\alpha; m} \cdot S_{\beta}, \quad (4.17)$$

где $t_{\alpha; m}$ – 5%-ная точка распределения Стьюдента с m степенями свободы.

При этом следует проверить предпосылки регрессионного анализа об однородности выборочных дисперсий S_u^2 , т.е., используя критерий Кохрена, вычислить

$$G_{\text{max}} = \frac{S_{u_{\text{max}}}^2}{\sum_{u=1}^n S_u^2}. \quad (4.18)$$

Если вычисленное значение G_{max} окажется меньше значения $G_{\text{кр}}$, то гипотеза об однородности дисперсии принимается.

Для проверки гипотезы об адекватности модели используем критерий Фишера. Сравним общую дисперсию $S_{\xi_{\text{рп}}}^2$ с остаточной дисперсией $S_{\xi_{\text{рп}} \text{ост}}^2$.

$$S_{\xi_{\text{рп}}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\xi_{\text{рп}i} - \bar{\xi}_{\text{рп}})^2}{n-1}, \quad S_{\xi_{\text{рп}} \text{ост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\xi_{\text{рп}i} - \hat{\xi}_{\text{рп}i})^2}{n-l}, \quad (4.19)$$

где $l = k + 1$ – число членов аппроксимирующего полинома, k – число факторов.

Далее определяется экспериментальное значение F–критерия

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\xi_{\text{рп}}}^2}{S_{\xi_{\text{рп,ост}}}^2}, \quad (4.20)$$

который в данном случае показывает, во сколько раз уравнение регрессии предсказывает результаты опытов лучше, чем среднее $\bar{\xi}_{\text{рп}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_{\text{рп}i} = \text{const}$.

Если $F_{\text{расч}} < F_{\alpha; m_1; m_2}$, то уравнение регрессии адекватно. Эффективность уравнения регрессии зависит от разницы $F_{\text{расч}}$ и $F_{\alpha; m_1; m_2}$: чем меньше значимость отличия $F_{\alpha; m_1; m_2}$ от $F_{\text{расч}}$ для выбранного α и числа степеней свободы $m_1 = n - 1, m_2 = n - 1$, тем выше эффективность уравнения регрессии.

Для повышения надежности и достоверности осуществляется m^* параллельных измерений, тогда число экспериментальных значений величины $\xi_{\text{рп}}$ составит $n_{\text{сум}} = n \cdot m^*$.

Оценка адекватности модели происходит следующим образом:

- определяется $\bar{\xi}_{\text{рп}l} = \frac{1}{m^*} \sum_{j=1}^{m^*} \xi_{\text{рп}ij}$ – среднее из серии параллельных опытов при $\beta = \beta_i$, где $\xi_{\text{рп}ij}$ – значение параметра $\beta = \beta_i$, в j -м случае;
- рассчитывается значение параметра $\hat{\xi}_{\text{рп}l}$ по уравнению регрессии при $\beta = \beta_i$;
- рассчитывается дисперсия адекватности

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{m \cdot \sum_{i=1}^n (\xi_{\text{рп}i} - \hat{\xi}_{\text{рп}})^2}{n-l}, \quad (4.21)$$

где n – число значений x_i (для линейной зависимости $l = 2$);

- определяется дисперсия воспроизводимости

$$S_{\text{восп}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i^2 \quad (4.22)$$

с числом степеней свободы этой дисперсии равным $m = n(m^* - 1)$;

- определяется теоретическое значение этого же критерия $F_{\alpha; m_1; m_2}$, где $m_1 = n - l, m_2 = n(m^* - 1)$;

– если $F_{\text{расч}} \leq F_{\alpha; m_1; m_2}$, то уравнение регрессии адекватно, в противном случае нет.

Модель адекватна, если все указанные проверки дают положительный

результат. Основным способом проверки адекватности модели исследуемому объекту является практическое использование. При принятии решения, когда модель адекватна, возможны три варианта: 1) все коэффициенты регрессии значимы; 2) часть коэффициентов регрессии значима, часть незначима; 3) все коэффициенты модели незначимы. В каждом варианте оптимум может быть близок, далёк или о его положении ничего не известно.

При варианте, когда часть коэффициентов значима, а часть нет, выбирается решение, которое приводит к получению значимых коэффициентов. Производится переход от коэффициентов подобия к натуральным факторам и движение производится только по значимым факторам. Строится матрица планирования, и если при реализации этой матрицы планирования удастся достичь высоких значений параметров оптимизации, а при крутом восхождении улучшить их не удаётся, то наиболее оправданным решением является построение плана второго порядка для описания области оптимума или окончания исследования.

Если модель первого порядка неадекватна, то переходят к построению планов второго порядка. Если уже был ранее сформирован план ПФЭ, но точность его функции отклика не удовлетворяет, то этот план дорабатывается до плана второго порядка и формируется функция отклика в виде полного квадратичного полинома, без потери информации о ранее сделанных опытах.

Чтобы воспользоваться полиномом второго порядка необходимо, чтобы каждый фактор варьировался не менее чем на трёх уровнях. Для упрощения записи условий эксперимента и обработки экспериментальных данных масштабы по осям выбирают так: верхний уровень составлял +1, нижний –1, а основной уровень 0. Для факторов с непрерывной областью определения кодирование факторов происходит по формуле:

$$P'_{ik} = \frac{P'_{i0} - P'_{i0}}{\Delta P'_i} \quad (4.23)$$

где P'_{ik} – кодированное значение i – го фактора; P'_i – натуральное значение фактора; P'_{i0} – нулевой уровень; $\Delta P'_i$ – интервал варьирования факторов.

Интервал варьирования факторов находим по формуле

$$\Delta P = (P'_{iv}(+) - P'_{in}(-))/2. \quad (4.24)$$

где $P'_{iv}(+)$ – верхний уровень симметрично расположенного относительно основного уровня; $P'_{in}(-)$ – нижний уровень симметрично расположенного относительно основного уровня.

Для сокращения числа опытов необходимо воспользоваться композиционным или последовательным планом. В таблице 4.2 представлен ортогональный план второго порядка.

Таблица 4.2 Ортогональный план второго порядка

№	$P'_{0к}$	$P'_{1к}$	$P'_{2к}$	$P'_{3к}$	$P'_{1к}$ $P'_{2к}$	$P'_{1к}$ $P'_{3к}$	$P'_{2к}$ $P'_{3к}$	$(P'_{1к})^2$ -11/15	$(P'_{2к})^2$ -11/15	$(P'_{3к})^2$ -11/15	$\xi_{рп}$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	4/15	4/15	4/15	$\xi_{рп1}$
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	4/15	4/15	4/15	$\xi_{рп2}$
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	4/15	4/15	4/15	$\xi_{рп3}$
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	4/15	4/15	4/15	$\xi_{рп4}$
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	4/15	4/15	4/15	$\xi_{рп5}$
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	4/15	4/15	4/15	$\xi_{рп6}$
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	4/15	4/15	4/15	$\xi_{рп7}$
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	4/15	4/15	4/15	$\xi_{рп8}$
9	+1	-1,215	0	0	0	0	0	23/30	-11/15	-11/15	$\xi_{рп9}$
10	+1	+1,215	0	0	0	0	0	23/30	-11/15	-11/15	$\xi_{рп10}$
11	+1	0	-1,215	0	0	0	0	-11/15	23/30	-11/15	$\xi_{рп11}$
12	+1	0	+1,215	0	0	0	0	-11/15	23/30	-11/15	$\xi_{рп12}$
13	+1	0	0	-1,215	0	0	0	-11/15	-11/15	23/30	$\xi_{рп13}$
14	+1	0	0	+1,215	0	0	0	-11/15	-11/15	23/30	$\xi_{рп14}$
15	+1	0	0	0	0	0	0	-11/15	-11/15	-11/15	$\xi_{рп15}$

В результате расчётов по матрице с преобразованными столбцами для квадратичных эффектов получим уравнение регрессии в виде:

$$\xi_{рп} = \beta'_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} \beta_i P'_{ik} + \sum_{1 \leq i \leq j \leq k} \beta_{ij} P'_{ik} P'_{jk} + \sum_{1 \leq i \leq k} \beta_{ii} (P_{ik}^2 - \varphi_k), \quad (4.25)$$

где φ_k – параметр ортогональных планов второго порядка (11/15).

Чтобы перейти к обычной форме записи, необходимо найти значение

$$\beta_0 = \beta'_0 - \sum_{1 \leq i \leq k} \varphi_k \beta_{ii}. \quad (4.26)$$

Уравнение (4.25) в привычном виде

$$\xi_{рп} = \beta_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} \beta_i P'_{ik} + \sum_{1 \leq i \leq j \leq k} \beta_{ij} P'_{ik} P'_{jk} + \sum_{1 \leq i \leq k} \beta_{ii} (P'_{ik})^2. \quad (4.27)$$

Определение значений коэффициентов регрессии по результатам опытов происходит по формуле

$$\beta'_0 = \frac{\sum_{u=1}^n \xi_{рп}}{N}. \quad (4.28)$$

Оценка параметров

$$\beta_1 = \frac{\sum_{u=1}^n P'_{2ку} \xi_{рп}}{10,9544}, \quad (4.29)$$

$$\beta_2 = \frac{\sum_{u=1}^n P'_{6ку} \xi_{рп}}{10,9544}, \quad (4.30)$$

$$\beta_3 = \frac{\sum_{u=1}^n P'_{7ку} \xi_{рп}}{10,9544}, \quad (4.31)$$

$$\beta_{11} = \frac{\sum_{u=1}^n P'^2_{2ку} \xi_{рп}}{4,364}, \quad (4.32)$$

$$\beta_{22} = \frac{\sum_{u=1}^n P'^2_{2ку} \xi_{рп}}{4,364}, \quad (4.33)$$

$$\beta_{33} = \frac{\sum_{u=1}^n P'^2_{3ку} \xi_{рп}}{4,364}, \quad (4.34)$$

$$\beta_{12} = \frac{\sum_{u=1}^n P_{1ку} P_{2ку} \xi_{рп}}{8}, \quad (4.35)$$

$$\beta_{13} = \frac{\sum_{u=1}^n P_{1ку} P_{3ку} \xi_{рп}}{8}, \quad (4.36)$$

$$\beta_{23} = \frac{\sum_{u=1}^n P_{2ку} P_{3ку} \xi_{рп}}{8}. \quad (4.37)$$

Проверка адекватности модели происходит посредством критерия Фишера. Для нахождения экстремума второго порядка необходимо выполнить достаточные и необходимые условия. Необходимые условия экстремума первого порядка:

$$\frac{\partial f}{\partial P'_{ik}} = 0. \quad (4.38)$$

В результате решения системы n в общем случае нелинейных алгебраических уравнений с n неизвестными получим точки P^*_{ik} .

В найденных стационарных точках P^*_{ik} проверяется выполнение достаточных, а если они не выполняются, то необходимых условий второго порядка с по-

мощью угловых и главных миноров матрицы Гессе. Для того, чтобы матрица Гессе $H(x^*)$ была положительно определенной $H(P_{ik}^*) > 0$, и точка P_{ik}^* являлась точкой локального минимума, необходимо и достаточно, чтобы знаки угловых миноров были строго положительны:

$$\Delta_1 > 0 \quad \Delta_2 > 0, \dots, \Delta_n > 0. \quad (4.39)$$

Для того, чтобы матрица Гессе $H(P_{ik}^*)$ была отрицательно определенной $H(P_{ik}^*) < 0$ и точка P_{ik}^* являлась точкой локального максимума, необходимо и достаточно, чтобы знаки угловых миноров чередовались, начиная с отрицательного:

$$\Delta_1 < 0 \quad \Delta_2 > 0, \dots, (-1^n) \Delta_n > 0. \quad (4.40)$$

Для проверки полученных значений глобального максимума процесса акусто-магнитной обработки геотермальной воды необходимо вычислить значение функции по модели (4.27) в точках экстремума.

После проверки значимости коэффициентов регрессии и отсеивания незначительных переменных происходит проверка модели на адекватность по критерию Фишера. Для построения сечения поверхности отклика необходимо произвести каноническое преобразование уравнения (4.27). Для этого координаты точки P_{ik}^* подставляем в уравнение (4.27), получив тем самым оптимизацию в новом центре. Следующим шагом будет определение угла поворота координат в новом центре по соотношению

$$\tan 2\alpha = \frac{\beta_{12}}{\beta_{11} - \beta_{22}}, \quad (4.41)$$

где α – угол поворота осей.

Если знак угла поворота отрицательный, то поворот осей происходит по часовой стрелке, а если положительный, то наоборот.

Коэффициенты регрессии в канонической форме определяется из уравнений:

$$\begin{aligned} B_{11} &= \beta_{11} \cos^2 \alpha + \beta_{12} \sin \alpha \cos \alpha + \beta_{22} \sin^2 \alpha; \\ B_{22} &= \beta_{11} \sin^2 \alpha + \beta_{12} \sin \alpha \cos \alpha + \beta_{22} \cos^2 \alpha; \\ B_{12} &= 2(\beta_{22} - \beta_{11}) \sin \alpha \cos \alpha + \beta_{12}(\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) = 0. \end{aligned} \quad (4.42)$$

Для построений линий двумерного сечения используется уравнение

$$\xi_{\text{рп}} - \beta_0 = P_1^2 + P_2^2. \quad (4.43)$$

Точки кривых сечения находятся с помощью стандартного уравнения.

4.2 Изготовление лабораторного стенда и описание методики экспериментальных исследований

В настоящее время безреагентная обработка жидкости не нашла широкого применения несмотря на очевидные преимущества, что обусловлено несколькими объективными факторами:

- низкая эффективность предлагаемых методов;
- найденный эффект до сих пор не имеет теоретического объяснения;
- наличие множества влияющих на систему неустановленных факторов;
- не существует оперативных и надежных методов контроля, а также оценки эффективности процесса.

Есть возможность решить проблему эффективности безреагентной обработки жидкости посредством объединения двух методов безреагентной обработки в один композиционный, при котором жидкость обрабатывается совместным действием акустического и магнитного полей. Определить скрытые факторы возможно только путем проведения запланированных экспериментов с последующим построением математической модели изучаемого процесса.

Приступим к формированию целей системы, адекватно отражающих выбранные проблемные ситуации. При рассмотрении принципа системности требуется учет всех возможных ограничений:

- количество проведенных опытов должно быть минимально возможным;
- используемые приборы имеют ограниченную точность;
- исследования должны быть организованы на основе недорогих материалов;
- по причине незначительного проявления эффекта нежелательно использовать отдельно методы обработки жидкости (применение акустической и

магнитной обработки жидкости).

Осуществим разработку модели типа «черный ящик» для системы акусто-магнитной обработки воды. Основное целевое предназначение выбранной системы состоит в создании удобной в эксплуатации и недорогостоящей системы, обеспечивающей экономию геотермальных ресурсов и продление срока эксплуатации теплотехнического оборудования. Ограничение на целевую установку накладываются с позиции исключения дорогостоящих методов обработки воды. Из поставленной цели и накладываемых ограничений следуют определенные требования:

- система должна быть малогабаритной и иметь небольшой вес;
- экономия геотермальных вод обеспечивается за счет снижения накипеобразования;
- должен применяться способ безреагентной обработки жидкости.

Для проведения исследований разработан лабораторный стенд. Стенд (рисунок 4.1) представляет собой имитацию замкнутой системы теплоснабжения. Акусто-магнитный аппарат надевается на трубопровод посредством посадки с натягом. На стенде установлен электрический насос, совмещенный с нагревательным элементом в одном корпусе.



Рисунок 4.1 – Общий вид экспериментальной установки для определения эффективности акусто-магнитных аппаратов обработки воды

В экспериментальной установке предусмотрен шламоуловитель, на дне которого расположено предметное стекло, для определения кристаллооптическим способом эффективности обработки воды магнитным полем. Скорость движения воды регулируется с помощью электрического шарового вентиля. Для того, чтобы предотвратить в замкнутой системе образование воздушных пробок и разрыва трубопровода, был установлен спускной вентиль (кран Маевского).

На структурной схеме работы стенда (рисунок 4.2) представлена имитация замкнутой системы теплоснабжения. Работа осуществляется следующим образом: вода заливается через воронку в экспериментальную установку и нагнетается в блок, совмещенный с циркуляционным насосом, из отстойника поступает в отопительную батарею, проходит через электрический шаровый вентиль, акустомагнитный аппарат и поступает в обратный вентиль батареи. Скорость движения воды изменяется электрическим шаровым вентилем.

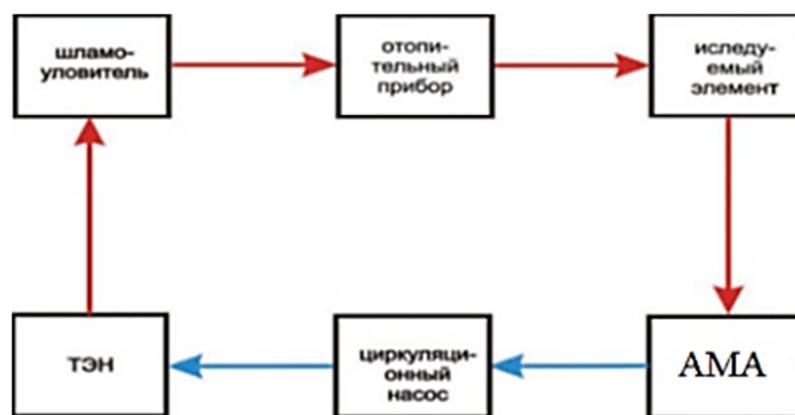


Рисунок 4.2 – Структурная схема стенда для определения эффективности акустомагнитного аппарата

Проходя нагревательный элемент, вода нагревается до температуры 70–80С⁰. Вода, нагретая до нужной температуры (внутри блока совмещенного насоса и нагревательного элемента установлен датчик температуры, настроенный на срабатывание при температуре 70 С⁰), поступает в шламоуловитель, а затем через отопительный прибор, отстойник с исследуемым элементом (металлическая пластина или предметное стекло, на которых образуется накипь). Отработанная вода сливается в емкость. Накипь, которая была удалена с внутренней стенки батареи,

оседает в нижней части шламоуловителя (отстойника). Таким образом, выделившаяся взвесь (шлам), прошедшая аппарат и батарею оседает в шламоуловителе (отстойнике) на стекле. После проведения эксперимента предметное стекло изучается под микроскопом, в результате чего определяется количество выделившейся твердой фазы.

К акусто-магнитному аппарату подводилось напряжение различной формы (прямоугольное, треугольное) от псевдо-трёхфазного генератора. Сами акусто-магнитные аппараты имели три и девять обмоток. На рисунке 4.3 представлена осциллограмма, снятая с одной из фаз псевдотрёхфазного генератора, при подаче сигнала типа меандр.

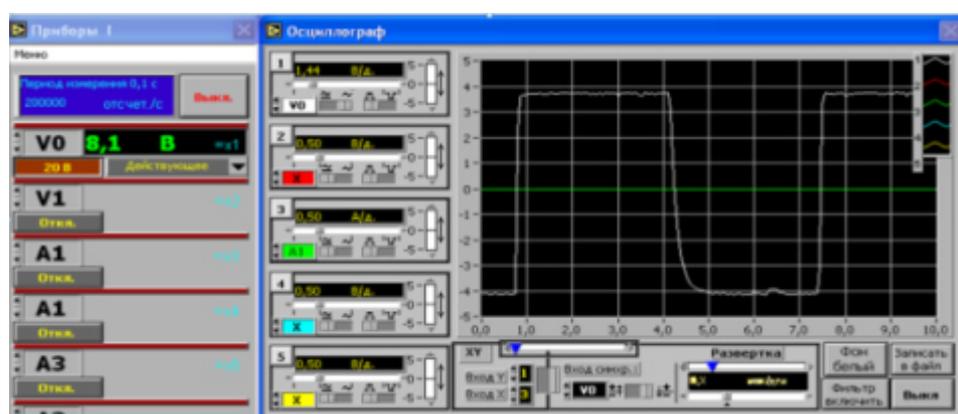


Рисунок 4.3 – Осциллограмма, снятая с одной из фаз трёхфазного генератора

На рисунке 4.4 представлена осциллограмма, снятая с одной из фаз акусто-магнитного аппарата, имеющего девять обмоток.

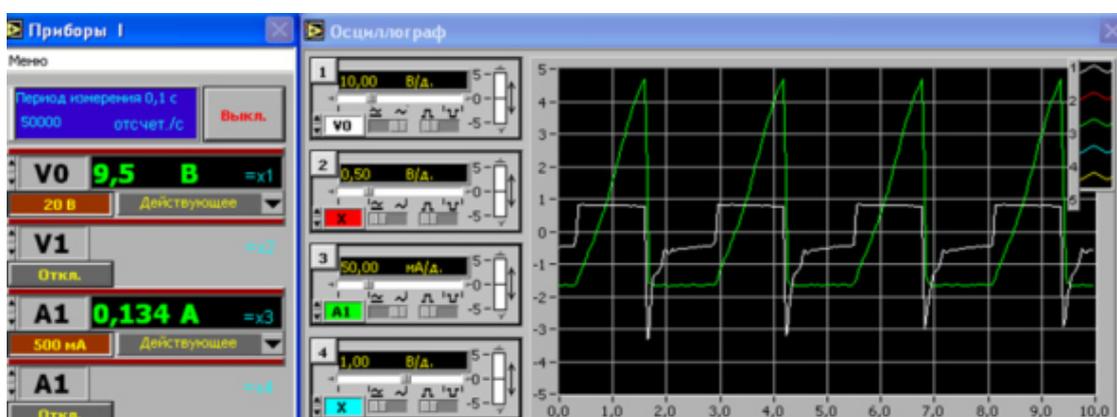


Рисунок 4.4 – Осциллограмма, снятая с третьей фазы акусто-магнитного аппарата, имеющего девять обмоток

На рисунке 4.5 представлена осциллограмма, снятая с одной из фаз акусто-магнитного аппарата, имеющего три обмотки.

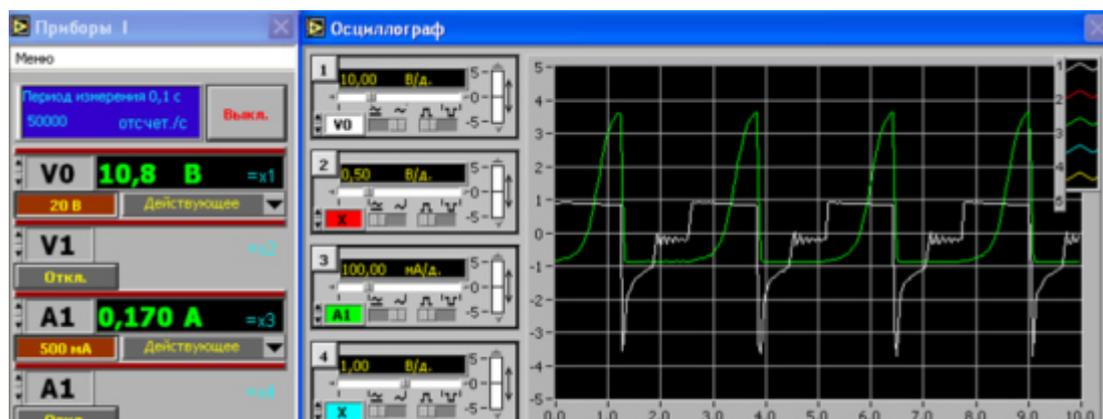


Рисунок 4.5 – Осциллограмма, снятая с третьей фазы акусто-магнитного аппарата, имеющего три обмотки

Электрическая схема управления и контроля установкой позволяет:

- изменять подводимое напряжение и его вид;
- питать постоянным и переменным током;
- производить измерения напряжения, тока, температуры;
- изменять частоту трёхфазного напряжения.

Изменяемое напряжение позволяет варьировать значение магнитной индукции в зоне воздействия, и тем самым, изменять степень магнитной обработки.

Форма питающего сигнала оказывает большое влияние на процесс акусто-магнитной обработки. Используется как прямоугольный, так и треугольный переменный ток, частотой 18–50 КГц. Но, как показали экспериментальные исследования по определению эффективности акусто-магнитной обработки, использование прямоугольного тока является оптимальным [181]. Контроль за параметрами питания электроустановки осуществляется с помощью вольтметра, амперметра, ваттметра. Контроль за температурой теплоносителя в различных точках установки осуществляется с помощью пирометра.

Защиту схемы от коротких замыканий и длительных перегрузок выполняет автоматические выключатели серии ВА ($I_n=10$ А). Защиту водонагревателя от перегрузок осуществляет тепловое реле, встроенное в корпус насоса и нагревателя,

от снижения питающего напряжения, магнитный пускатель серии ПМЛ. В качестве соединительных проводов используется провод марки ПВС сечением 1,5 мм².

Для проведения экспериментальных исследований применялся метод контроля, основанный на учете количества выделившейся твёрдой фазы, состоящий в следующем. Определение эффективности акусто-магнитной обработки производится при помощи способа, основанного на выделении накипи на специальном элементе, являющемся поверхностью нагрева и испарения, имитирующем процесс в котле при атмосферном давлении. Лабораторный прибор состоит из электронагревателя, стакана емкостью не менее 800 мл и электроплитки. Электроплитка служит для ускорения подогрева всего объема исследуемой воды и не является обязательной. Ёмкостью для нагревателя может служить пробирка из тугоплавкого стекла диаметром 25 – 35 мм и длиной 170 – 180 мм. Внутри пробирки помещается стержень из керамики с обмоткой из нихрома, намотанной бифилярно. Пробирку заполняют кварцевым песком и закрывают пробкой, через которую выводят гибкие проводники от спирали.

Мощность спирали нагревателя подбирается такой, чтобы она обеспечила умеренное кипение 500 мл воды. Как показали исследования, материал пробирки особого значения не имеет. Значительное влияние оказывает состояние поверхности: чем больше ее шероховатость, тем быстрее выделяется накипь. Нагреватель полностью погружается в стакан с крышкой. Крышку стакана подбирают из неметаллического материала, не подвергающегося деформации при 100 °С. В центре крышки вырезают отверстие для нагревателя, термометра и выхода пара. Нагреватель укрепляют в крышке с помощью резинового кольца (шайбы) и располагают с зазором около 10 мм от дна стакана. Для эксперимента берут 0,5 л, если карбонатная жесткость ее более 2 мг–экв/кг, и полностью заливают в стакан (при меньшей жесткости берут 1 л воды). Из отмеренного объема в стакан заливают сначала 0,5 л, а остальное количество доливают по мере упаривания. Стакан закрывают крышкой, отмечают уровень воды по стеклу, включают нагреватель и электроплитку и фиксируют время. Как только температура достигает 40 °С,

плитку выключают и пользуются только нагревателем. Воду нагревают до кипения и кипятят её 5 – 10 мин при постоянном уровне, поддерживая его доливом дистиллированной воды. По истечении указанного времени нагреватель включают и определяют продолжительность нагрева, который поддерживают при последующих попытках. Через 2–3 мин нагреватель осторожно извлекают из стакана и 2–3 раза погружают в предварительно подогретую до 60–70 °С дистиллированную воду для удаления легко отделяющихся частиц. Количество выделившейся накипи на нагревателе определяют объемным методом. Для этого нагреватель помещают в емкость большего диаметра или другую подходящую емкость и осторожно из бюретки приливают 0,1 % соляной кислоты с расчетом, чтобы вся выделившаяся на испытуемой поверхности накипь была полностью растворена. Отмечают количество кислоты, взятой для растворения. Затем содержимое емкости переливают в коническую колбу, тщательно промывают ёмкость и нагреватель, собирая промывные воды в ту же колбу. Добавляют индикатор метиловый оранжевый и нейтрализуют избыток кислоты 0,1 % едким натром, отмечая расход последнего. До растворения накипи кислотой с нагревателя может быть снято несколько кристалликов для исследования под микроскопом.

Опыт проводят сначала с водой, необработанной акусто-магнитным полем, а затем в том же приборе и при тех же условиях с обработанной водой. Перед проведением опыта стакан и электронагреватель должны быть промыты слабой соляной кислотой и несколько раз – дистиллированной водой. Сопоставимые результаты могут быть получены только в том случае, если все операции выполняются в строго одинаковых условиях. Для этого необходимо следить, чтобы выдерживались одинаковыми скорость подъема температуры, продолжительность опыта и время кипения. Каждое определение повторяют по возможности 2 раза и берут среднее значение. Противонакипный эффект рассчитывают по формуле (4.44), где N и M расход 0,1 % кислоты на растворение накипи в необработанной и обработанной воде. Шлам, собирающийся на дне стакана, может быть использован для определения шламового эффекта [13].

Шламовый эффект, определяют по количеству кислоты, затраченной на

растворение осадка необработанной (Н) и обработанной (М) воды.

Эффективность безреагентной обработки определяли из соотношения:

$$\xi_{\text{рпэ}} = \left(\frac{M-H}{H} \right), \quad (4.44)$$

где М – объём кислоты, затраченной на растворение осадка обработанной воды, литры; Н – объём кислоты, затраченной на растворение осадка необработанной воды, литры; $\xi_{\text{рпэ}}$ – коэффициент противонакипного эффекта экспериментальный.

Для экспериментальных исследований были намотаны на ферритовые кольца три и девять катушек медного провода по схеме, представленной на рисунке 3.3. Катушки акусто-магнитного аппарата выполнялись медным проводом ПЭТВ-2 диаметром 0,16мм и температурным индексом – 130 °С. Термопластичный поток 200 °С. Для каждого ферритового кольца с обмотками были проведены экспериментальные и теоретические исследования при различных значениях напряжения для следующих схемах питания: псевдо-трёхфазное прямоугольное напряжение, переменный ток частотой 18-50 кГц; псевдо-трёхфазное треугольное напряжение, переменный ток частотой 18-50 кГц. Регулирование величины напряжения осуществлялось при помощи блока стабилизированного регулируемого напряжения. Были проведены исследования и опыты по изучению влияния магнитной и акустической систем аппарата на обрабатываемые жидкие вещества (воды из геотермальных источников и гидропонного раствора), величины длины рабочей зоны аппарата на противонакипный эффект. Для измерения магнитной индукции использовался щуп с датчиком. Датчик вносился в рабочий зазор аппарата и перемещался по характерным точкам измерительной линейкой. Измерения магнитной индукции проводились по радиусу сечения, вдоль оси аппарата и вдоль стенки аппарата. Магнитная индукция измерялась милливольтметром, на который поступал сигнал с датчика. Датчик представляет собой катушку, выполненную проводом диаметром 0,1 мм, содержащую 100 витков, на каркасе диаметром 10мм и длиной 8 мм. Датчик был тарирован по тесламетру типа «Универсальный 4320». Значение магнитной индукции определяется по формуле

$$B = \frac{U_{cp}}{4,44 \cdot f \cdot n_{кат} \cdot S_{кат}} = \frac{83,54 \cdot 10^{-6}}{4,44 \cdot 47 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 7,85 \cdot 10^{-7}} = 5,1 \cdot 10^{-6} \text{ Тл}, \quad (4.45)$$

где U_{cp} – среднее напряжение на выходе микровольтметра; $n_{кат}$ – число витков катушки; $S_{кат}$ – сечение каркаса катушки датчика.

Влияние магнитного поля на воду оценивалось по числу узлов кристаллизации при помощи кристаллооптического метода. В результате были установлены наиболее оптимальные параметры акусто-магнитного аппарата: длина рабочей поверхности аппарата, вид подаваемого напряжения, сила ток, количество витков в обмотке, диаметр провода и т.д. Для оптимизации конструкции акусто-магнитного аппарата были проведены исследования по определению параметров: ток цепи, магнитная индукция, магнитный поток, магнитная напряжённость, индуктивность катушки при различных видах подаваемого питания, активное и реактивное сопротивление катушки аппарата, распределение температуры на поверхности аппарата, влияние времени обработки на количество узлов кристаллизации. Результаты одного из исследований представлены на рисунке 4.6:

№	Изнач.	Значения	Параметры	Результаты	График	Индукция	Магнитный поток	Магнитная напряжённость	Индуктивность катушки	Активное сопротивление катушки	Реактивное сопротивление катушки	Средняя температура поверхности	Время кристаллизации	Число узлов кристаллизации	
1	8.88	47000	0.000045	0.000045	8.000045	73.4	73.4	73.4	1.6779e-8	6.5829	1.2839e-11	35.924	0.14637	0.14637	0.14637
1	1.7782	47000	0.000045	0.000045	8.000045	73.4	73.4	73.4	1.6779e-8	6.5829	1.2839e-11	35.924	0.14635	0.14635	0.14635
2	8.88	44630	0.000045	0.000045	8.000045	73.4	73.4	73.4	2.085e-8	7.3198	1.3639e-11	35.924	0.14664	0.14664	0.14664
3	8.88	47000	3.4294e-5	0.000045	8.000045	73.4	73.4	73.4	1.5779e-8	6.5829	1.2839e-11	35.924	0.14634	0.14634	0.14634
4	8.88	47000	0.000045	5.7094e-5	8.000045	73.4	73.4	73.4	1.6779e-8	6.5829	1.2839e-11	35.924	0.14612	0.14612	0.14612
5	8.88	47000	0.000045	0.000045	0.0000451	73.4	73.4	73.4	1.6779e-8	6.5829	1.2839e-11	35.924	0.14566	0.14566	0.14566
6	8.88	47000	0.000045	0.000045	8.000045	60.494	73.4	73.4	1.6779e-8	6.5829	1.2839e-11	35.924	0.14963	0.14963	0.14963
7	8.88	47000	0.000045	0.000045	8.000045	73.4	64.676	73.4	1.6779e-8	6.5829	1.2839e-11	35.924	0.15094	0.15094	0.15094
8	8.88	47000	0.000045	0.000045	8.000045	73.4	73.4	70.742	1.6779e-8	6.5829	1.2839e-11	35.924	0.14604	0.14604	0.14604
9	0.95454	46939	4.2323e-5	4.9123e-5	4.7377e-5	70.173	71.059	74.91	2.0337e-8	6.7598	1.6259e-11	35.924	0.14727	0.14727	0.14727
10	1.1232	46939	5.3633e-5	4.9787e-5	4.7879e-5	69.367	70.466	74.915	6.5811e-8	6.5811	1.2839e-11	35.924	0.14754	0.14754	0.14754
11	1.129	46939	0.0000484	4.4637e-5	4.8315e-5	65.309	68.758	75.291	2.0285e-8	6.5829	1.2839e-11	35.924	0.14642	0.14642	0.14642
12	1.162	46247	8.000473	4.4103e-5	3.7756e-5	67.098	68.847	75.704	2.0285e-8	6.5829	1.2839e-11	35.924	0.14663	0.14663	0.14663
13	1.3513	45909	4.7675e-5	4.3878e-5	4.5453e-5	81.655	67.708	76.385	2.042e-8	7.0183	2.6125e-11	35.924	0.14327	0.14327	0.14327
14	1.5178	45467	4.8594e-5	4.2598e-5	4.5563e-5	70.813	77.941	77.094	2.5879e-8	7.1348	2.9815e-11	35.924	0.13998	0.13998	0.13998
15	1.7233	44958	4.9493e-5	4.2247e-5	4.5713e-5	70.186	68.753	71.983	2.6795e-8	7.2831	3.4304e-11	35.924	0.14689	0.14689	0.14689
16	2.2589	43637	5.1779e-5	0.00004217	4.6807e-5	68.55	67.628	68.827	2.1349e-8	7.6737	4.589e-11	35.924	0.15488	0.15488	0.15488
17	2.12	47420	5.1779e-5	0.00004229	4.5978e-5	68.954	68.385	75.644	1.8942e-8	6.6249	4.0152e-11	35.924	0.14949	0.14949	0.14949
18	1.288	45463	5.5067e-5	3.8208e-5	0.00004325	71.875	70.646	74.717	2.6589e-8	7.1237	4.2006e-11	35.924	0.14371	0.14371	0.14371
19	2.2465	45344	4.2813e-5	3.4809e-5	4.1474e-5	73.309	70.517	74.385	2.6644e-8	7.1348	4.6255e-11	35.924	0.1465	0.1465	0.1465
20	3.0084	44648	3.7958e-5	2.7874e-5	3.8239e-5	78.28	78.533	74.911	2.9244e-8	7.3722	6.0112e-11	35.924	0.14557	0.14557	0.14557
21	1.7527	45803	4.9572e-5	4.7285e-5	3.8112e-5	70.946	71.44	73.687	3.6744e-8	7.145	5.4958e-11	35.924	0.14649	0.14649	0.14649
22	3.0083	45878	4.9683e-5	3.8589e-5	4.9138e-5	70.546	72.928	72.694	2.9751e-8	7.2803	4.3612e-11	35.924	0.14643	0.14643	0.14643
23	3.2888	45204	4.9578e-5	3.7487e-5	4.2385e-5	64.461	75.458	71.188	2.6595e-8	7.2106	6.5020e-11	35.924	0.1461	0.1461	0.1461
24	4.258	44951	5.0789e-5	3.4291e-5	0.00004085	55.864	76.333	68.604	2.0942e-8	7.3137	8.4740e-11	35.924	0.15384	0.15384	0.15384
25	3.8063	45468	4.9288e-5	3.5441e-5	4.1892e-5	71.566	65.574	68.327	2.5594e-8	7.14	7.4045e-11	35.924	0.15335	0.15335	0.15335
26	4.053	42822	5.2958e-5	3.2846e-5	4.0823e-5	68.521	68.158	70.793	2.1696e-8	7.93	8.3999e-11	35.924	0.1533	0.1533	0.1533
27	4.1943	41879	4.8473e-5	3.1274e-5	3.8320e-5	72.859	71.118	67.261	2.2132e-8	8.2931	8.8896e-11	35.924	0.15324	0.15324	0.15324
28	5.2315	39644	0.00004712	2.5691e-5	3.4564e-5	74.611	75.465	63.099	2.4692e-8	9.28	1.0737e-10	35.924	0.15894	0.15894	0.15894
29	4.9512	42176	4.2186e-5	3.2578e-5	3.8940e-5	70.671	72.818	65.294	1.9823e-8	8.1415	1.0399e-10	35.924	0.15829	0.15829	0.15829
30	5.121	43837	4.3078e-5	2.9566e-5	3.4358e-5	74.537	76.158	70.5	2.1327e-8	7.6879	1.1223e-10	35.924	0.14753	0.14753	0.14753
31	5.7215	41842	4.3818e-5	3.9717e-5	4.1379e-5	66.648	73.825	64.994	2.2120e-8	8.254	1.2995e-10	35.924	0.15794	0.15794	0.15794
32	7.2144	42117	4.0642e-5	3.0662e-5	4.2862e-5	61.946	75.017	60.946	2.3891e-8	8.8345	1.5782e-10	35.924	0.1657	0.1657	0.1657
33	6.5084	40646	0.00004123	4.1759e-5	2.8768e-5	68.752	73.771	62.425	2.2689e-8	8.6738	1.4001e-10	35.924	0.16334	0.16334	0.16334
34	7.3723	40072	5.2873e-5	3.2294e-5	3.7234e-5	58.885	78.796	58.112	2.9981e-8	8.8892	1.6182e-10	35.924	0.16941	0.16941	0.16941
35	5.4442	37783	6.1818e-5	1.9404e-5	3.6882e-5	90.687	78.427	90.122	2.412e-8	9.8109	1.2596e-10	35.924	0.18738	0.18738	0.18738
36	7.4672	37903	4.3659e-5	0.00001594	3.3531e-5	99.429	83.309	61.322	2.4057e-8	4.765	1.7176e-10	35.924	0.16294	0.16294	0.16294
37	5.7023	34121	4.0703e-5	0.00001071	2.9753e-5	53.36	92.177	57.829	2.6282e-8	11.607	1.40e-10	35.924	0.17283	0.17283	0.17283
38	6.9299	39320	3.6178e-5	3.2659e-5	3.2123e-5	80.201	84.512	96.538	2.3331e-8	9.1799	1.5464e-10	35.924	0.1728	0.1728	0.1728
39	6.177	35907	3.6492e-5	8.5404e-6	0.00002981	73.942	74.632	95.67	2.515e-8	18.682	1.4061e-10	35.924	0.17189	0.17189	0.17189
40	5.9022	37815	4.4232e-5	2.9456e-5	3.9563	81.601	96.575	9.9529	2.9522e-8	18.159	1.3847e-10	35.924	0.17211	0.17211	0.17211
41	5.8687	33874	4.2835e-5	3.8802e-5	3.2894e-5	62.615	78.638	46.137	2.6257e-8	11.943	1.4033e-10	35.924	0.17215	0.17215	0.17215
42	4.2396	37198	3.7694e-5	3.2401e-5	3.2123e-5	46.28	81.321	61.647	2.4425e-8	18.877	9.8979e-11	35.924	0.18515	0.18515	0.18515
43	6.6147	38951	4.4784e-5	1.5518e-5	3.3964e-5	67.753	76.946	60.206	2.3744e-8	9.4785	1.4949e-10	35.924	0.16574	0.16574	0.16574
44	6.1273	39615	4.0693e-5	2.2191e-5	3.8403e-5	63.388	74.651	58.94	2.3182e-8	9.0642	1.3812e-10	35.924	0.16965	0.16965	0.16965
45	6.8634	38958	4.2835e-5	1.5459e-5	3.6263e-5	62.529	79.528	58.423	2.3589e-8	9.3217	1.6620e-10	35.924	0.16928	0.16928	0.16928
46	5.3281	44829	4.1818e-5	2.8771e-5	3.5877e-5	73.047	71.108	70.049	2.118e-8	7.555	1.0707e-10	35.924	0.14906	0.14906	0.14906
47	6.9388	36413	4.2566e-5	7.2087e-6	3.3572e-5	57.691	78.495	53.615	2.4063e-8	18.438	1.5679e-10	35.924	0.17949	0.17949	0.17949
48	6.2613	36198	4.3713e-5	5.0236e-6	4.1206e-5	66.843	83.391	53.589	2.4083e-8	18.541	1.4064e-10	35.924	0.17202	0.17202	0.17202
49	6.385	41812	5.0258e-5	0.00001924	4.2892e-5	49.878	83.718	99.786	8.5442	1.5795e-10	35.924	0.18888	0.18888	0.18888	
50	6.794	37183	0.00001991	5.8932e-6	3.3081e-5	67.926	78.904	96.699	2.4441e-8	18.883	1.5959e-10	35.924	0.18938	0.18938	0.18938

Рисунок 4.6 – Результаты моделирования по оптимизации магнитного потока

4.3 Разработка инженерной методики расчета параметров акусто-магнитных аппаратов

Процесс проектирования мог быть существенно ускорен и облегчен посредством использования опытных данных ранее изготовленных устройств. Однако, размеры, применяемые материалы, условия испытаний ранее изготовленных устройств не соответствовали условиям, для которых предназначен вновь проектируемый аппарат. Поэтому воспользоваться непосредственно имеющимися экспериментальными данными не представлялось возможным. Пришлось прибегнуть к использованию критериальных зависимостей. Для начала расчета был задан ряд величин. Исходные данные были приведены к граничным условиям колебания температуры, напряжения, неточности изготовления. Далее представлен расчёт одного из устанавливаемых на лабораторный стенд акусто-магнитных аппаратов, в дальнейшем, установленных в систему подачи гидропонного раствора. Исходные данные для расчета:

- материал излучателя – феррит;
- скорость распространения упругих колебаний в феррите $v = 4760$ (м/с);
- плотность магнитострикционного материала $\rho_c = 3 \div 8,90$ (г/см³);
- модуль упругости $E_B = 2 \div 2,1 \cdot 10^6$ (г/см²);
- начальная магнитная проницаемость $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ В·с/(А·м);
- магнитная постоянная материала: $\mu = 2000$ В·с/(А·м);
- напряжение, подаваемое на генератор: 14 В.

Из таблицы (рисунок Е.15 Приложения Е) подбираем трубу для установки на неё акусто-магнитного аппарата. Это труба полипропиленовая с наружным диаметром 16 мм, и внутренним диаметром $D_{тр.вн} = 10,6$ мм.

Расчет акусто-магнитного аппарата начинается с определения параметров рабочей зоны аппарата, так как конструктивно установка аппарата на трубу происходит посредством посадки с натягом. Для определения диаметра трубы, проходящей через рабочую зону аппарата, определяется площадь проходного сечения

воды в рабочем зазоре. Из таблиц для выбранной трубы находим $Q_p = 12,31 \text{ м}^3/\text{час}$ часовой расход воды ($Q_c = 0,00342 \text{ м}^3/\text{с}$); $m = 1$ (число включённых в параллель рабочих зазоров); $v = 0,5 \text{ м/с}$ (параметр скорости воды в рабочем зазоре аппарата); $\tau = 0,09 \text{ с}$ (время прохождения жидкости через активную зону аппарата):

$$S_B = \frac{Q_c}{0,36vm} = \frac{0,00342}{0,36 \cdot 0,5} = 0,019 \text{ м}^2. \quad (4.46)$$

Оптимальная скорость воды в рабочем зазоре установлена опытным путём и составляет $0,5 \text{ м/с}$. Длина пути жидкости в активной зоне аппарата:

$$L = v\tau = 0,5 \cdot 0,09 = 0,045 \text{ м}. \quad (4.47)$$

Диаметр трубы равен:

$$D = \sqrt{4S_B/\pi} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,019}{3,14}} = 0,159 \text{ м}. \quad (4.48)$$

Внутренний диаметр корпуса АМА:

$$d_{\text{вн}} = \frac{S_B}{\pi r} + r = \frac{0,02}{3,14 \cdot 0,0011} + 0,0011 = 0,16 \text{ м}. \quad (4.49)$$

После выбора диаметра трубы уточняется высота проходного сечения

$$r = 0,5 d_{\text{вн}} \sqrt{d_{\text{вн}}^2 - \frac{4S_B}{\pi}} = 0,5 \cdot 0,16 \sqrt{0,16^2 - \frac{4 \cdot 0,019}{3,14}} = 0,0011 \text{ м}. \quad (4.50)$$

Далее производится расчет параметров акусто-магнитного аппарата: выбор рабочей частоты излучателя на основе установленных опытным путем и рассчитанных по модели параметров. Рассчитав внутренний диаметр корпуса, находим из таблиц ближайший ферритовый сердечник с внутренним диаметром больше 16 мм. Этим требованиям удовлетворяет ферритовое кольцо М2000НМ, 40x25x6. Рассчитаем резонансную частоту выбранного ферритового кольца:

$$f = \frac{v}{2\pi R_{\text{ср}}} = \frac{4760}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,016} = \frac{4760}{0,1} = 47600 \text{ Гц}, \quad (4.51)$$

$$R_{\text{ср}} = \frac{R_{\text{нар}} + R_{\text{вн}}}{2} = \frac{0,02 + 0,012}{2} = 0,016. \quad (4.52)$$

По среднему диаметру определяем активную ширину кольца излучателя. Экспериментально установлено, что оптимальная ширина b активной части кольца лежит в пределах 15 – 20% величины среднего диаметра кольца излучателя $D_{\text{ср}}$:

$$b = (0,15 \div 0,2)D_{\text{cp}} = 0,20 \cdot 0,032 = 0,0064 \text{ м.} \quad (4.53)$$

Высота выбранного ферритового кольца составляет $h = 0,006$ м, что примерно соответствует расчётному значению.

Определяем наружный и внутренний диаметры колец излучателя:

$$D_{\text{вн}} = D_{\text{cp}} - \frac{b}{2} = 0,032 - \frac{0,0064}{2} = 0,032 - 0,0032 = 0,028, \quad (4.54)$$

$$D_{\text{н}} = D_{\text{cp}} + \frac{b}{2} = 0,032 + 0,0032 = 0,035. \quad (4.55)$$

Расчетные значения близки к реальным размерам кольца, поэтому в дальнейшем будем использовать реальные размеры выбранного кольца.

Сердечник акусто-магнитного аппарата можно охарактеризовать следующими размерами: $a = R_{\text{нар}} - R_{\text{вн}} = 0,02 - 0,012 = 0,008$ м; $b = 0,0064$ м; $c = D_{\text{вн}} = d = 0,025$ м.

В качестве базисного возьмём размер a . Используя систему относительных единиц, есть возможность определить остальные размеры и геометрические параметры в зависимости от двух безразмерных параметров и базисного размера:

$$\pi_{62} = \frac{c}{a} = \frac{0,025}{0,008} = 3,125, \quad \pi_{63} = \frac{b}{a} = \frac{0,0064}{0,008} = 0,8. \quad (4.56)$$

Значение коэффициента заполнения окна обмоткой $\pi_{\text{нз}}$ для акусто-магнитного аппарата находится из выражения:

$$\pi_{64} = \frac{\pi_{\text{н1}} - \frac{d_0}{a}}{\pi_{\text{н1}}} = \frac{3,125 - \frac{0,012}{0,008}}{3,125} = 0,52, \quad (4.57)$$

где d_0 – размер отверстия для прохождения челнока.

Обобщенные геометрические параметры аппарата имеют вид[19]:

$$S_c = \pi_{63} a^2 = 0,8 \cdot 0,008^2 = 0,0000512 \text{ м}^2; \quad (4.58)$$

$$S_0 = \frac{\pi}{4} (2 - \pi_{64}) \pi_{64} \pi_{62}^2 a^2 = \frac{3,14}{4} (2 - 0,52) \cdot 0,52 \cdot 3,125^2 \cdot 0,008^2 = 3,77 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, \quad (4.59)$$

$$l_0 = \left(\frac{\pi}{8} \left[\frac{(\pi_{62} + 1)(2 - \pi_{64}) \pi_{64} \pi_{62}^2}{\pi_{62}(\pi_{62} + 2)} + \sqrt{(\pi_{62} + 2)^2 + (2 - \pi_{64}) \pi_{64} \pi_{62}^2} + (\pi_{64} + 1) \pi_{62} - (\pi_{62} + 2) \right] + 2 \sqrt{\frac{(2 - \pi_{64}) \pi_{64} \pi_{62}^2}{4 \pi_{62}(\pi_{62} + 2)} + 1 + 2 \pi_{63}} \right) a =$$

$$\left(\frac{3,14}{8 \left(\frac{(3,125+1)(2-0,52)0,52 \cdot 3,125^2}{3,125(3,125+2)} + \sqrt{(3,125+2)^2 + (2-0,52)0,52 \cdot 3,125^2} + (0,52+1)3,125 - (3,125+2) \right)} + 2 \sqrt{\frac{(2-0,52)0,52 \cdot 3,125^2}{4 \cdot 3,125(3,125+2)} + 1 + 2 \cdot 0,8} \right) \cdot 0,008 = 0,0299 \text{ м} \approx 3 \text{ см.} \quad (4.60)$$

Средняя длина одного витка составила 30 мм для данного типоразмера ферритового кольца.

Число витков на вольт для магнитной части определяем по формуле:

$$n = \frac{33,3}{S_c} = \frac{33,3}{0,512} = 65 \text{ витков/вольт.} \quad (4.61)$$

Находим расчетные числа витков первичной и вторичной обмоток для одной из фаз акусто-магнитного аппарата:

$$n_{\text{пер}} = n \cdot U_c = 65 \cdot 14 = 910 \text{ витков,} \quad (4.62)$$

$$n_{\text{втор}} = n \cdot U_H = 65 \cdot 4,5 = 293 \text{ витка,} \quad (4.63)$$

где U_c – подаваемое на излучатель напряжение, U_H – подаваемое на обмотку управления напряжение.

Соответственно количество витков для трёх фаз аппарата – 2730 витков.

Ток, протекающий через аппарат, имеет активную $i_{\text{акт}}$ и реактивную i_p составляющие. Поскольку токи $i_{\text{акт}}$ и i_p сдвинуты по фазе на 90° (в силу свойства индуктивности), можно записать выражение для действующего значения тока аппарата:

$$i = \sqrt{i_{\text{акт}}^2 + i_p^2} = \sqrt{0,148^2 + 1,31 \cdot 10^{-3}^2} = 0,15 \text{ А.} \quad (4.64)$$

Формула для активной составляющей тока имеет вид:

$$i_{\text{акт}} = \frac{m_c P_o}{E_{\text{об}}} = \frac{0,02843 \cdot 73}{14} = 0,148 \text{ А,} \quad (4.65)$$

где $E_{\text{об}}$ – ЭДС всех обмоток аппарата (т.е. напряжение на обмотках трёх фаз).

Масса магнитопровода вычисляется, исходя из его объема:

$$m_c = \frac{\pi}{4} k_c \rho_c (D_{\text{нар}}^2 - D_{\text{вн}}^2) \cdot h = 0,02843 \text{ кг,} \quad (4.66)$$

где плотность феррита ($5,27 \cdot 10^{-3}$ кг/м³).

$$k_c = \frac{d}{d_{\text{покр}}} = \frac{0,0064}{0,0068} = 0,941, \quad (4.67)$$

где $d_{\text{покр}}$ – толщина ферритового кольца с учетом толщины покрытия.

Реактивная составляющая определяется по формуле:

$$i_p = \frac{H l_{\text{маг.ср}}}{n_{\text{пер}}} = \frac{24 \cdot 0,1}{1820} = \frac{0,145}{1820} = 1,31 \cdot 10^{-3} \text{ А}, \quad (4.68)$$

где $l_{\text{маг.ср}}$ – длина средней магнитной линии магнитопровода; $n_{\text{пер}}$ – число витков первичной обмотки аппарата (для трёх фаз).

Значение $H = 24$ А/м берется из кривой намагничивания для данного типа феррита и соответствует выбранной рабочей индукции B . Данные для построения кривой намагничивания приведены в таблицах 4.3-4.4.

Таблица 4.3 Параметры наиболее часто встречающихся ферритов марок НН и НМ

Марка	μ_n , о.е.	μ_{max} , о.е.	B_m , Тл	f_c , МГц	T_c , °С	B_r , Тл	H_c , А/м
2000НМ3	1700...2500	3500	0,35...0,4	0,5	200	0,12	25
2000НМ1	1700...2500	3500	0,38...0,4	0,5	200	0,12	25
1500НМ3	1200...1800	3000	0,35...0,4	1,5	200	0,08	16
1500НМ1	1200...1800	3000	0,35...0,4	0,7	2000	—	16
2000НМ	2000	3500	0,38...0,4	0,45	200	0,12	24
100НН	80...120	850	—	7,0	120	—	15
400НН	350...500	1100	0,25	3,5	110	0,12	64
600НН	500...800	1600	0,31	1,5	110	0,14	32
1000НН	800...1200	3000	0,27	0,4	110	0,15	20

Сечения провода обмотки моделируем по формуле:

$$d_{\text{провода}} = 1,13 \sqrt{\frac{i}{j_m}} = 1,13 \sqrt{\frac{0,15}{3,5}} = 0,23 \text{ мм}, \quad (4.69)$$

где j_m – допустимая плотность тока по условиям теплоотвода, экспериментально установлено [107], что $j_t \leq 3,5$ А/мм².

Выбирают ближайший диаметр провода в сторону уменьшения (0,2 мм). Изоляцию первичной обмотки производим микалентной бумагой толщиной 0,02 мм в два сложения с половинным перекрытием.

Таблица 4.4 Удельные потери некоторых ферромагнитных материалов

Марка	Частота, кГц	$P_{уд}$, Вт/кг	Толщина, мкм
3414	0,4 ... 20	22 ± 2	80
50НП	0,4 ... 20	14 ± 2	50
50НП	1	5	20
80НХС	1	1,5	10
79НМ	1	1,5	10
M2000 НМ-А	0,4 ... 100	32 ± 7	
M2000 НМ-А	100 ... 1000	13 ± 3	
M2000 НМ1-17	0,4 ... 100	63 ± 10	
M2000 НМ1-17	100 ... 1000	25 ± 4	
M3000 НМА	0,4 ... 200	48 ± 8	
M10000 НМ1	0,4 ... 100	$5,2 \pm 1$	

Для нахождения размеров аппарата в первую очередь определяются постоянные $\pi_{62}, \pi_{63}, \pi_{64}, \pi_{65}$. Зная базисный размер a , считая π_{65} отношением потерь в сердечнике к потерям в обмотке, получаем:

$$\pi_{65} = \frac{P_c}{r_0 i^2} = \frac{2,075}{220,34 \cdot 0,15^2} = 0,419. \quad (4.70)$$

Поскольку $P_c = m_c P_o = 0,02843 \cdot 73 = 2,075$ и $i = 0,15$ А, то остаётся вычислить $r_0 = r_1 + \left(\frac{n_{пер}}{n_{втор}}\right)^2 \cdot r_2 = \frac{14}{0,15} + 9,64 \cdot 13,18 = 220,34$ Ом.

Вычислим температуру превышения для ферритового кольца акусто-магнитного аппарата:

$$\Theta - T_{охл} = \frac{r_0 i_1^2 + P_c}{\alpha_0 F - \chi r i_1^2} = 32,806, \quad (4.71)$$

$$\Theta = 32,806 + 21 = 53,806 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4.72)$$

Коэффициент теплообмена $\alpha_0 = 25 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$. ТКС меди равен 0,01 1/К. Температура окружающей среды 21°C, тогда

$$\pi_{60} = \frac{(r_0 i^2 + P_c)}{(\Theta - T_{охл})(\alpha_0 F - \chi r_0 i^2)} = 1,103. \quad (4.73)$$

Процесс обработки солевого раствора воды физическими полями, представим зависимостью:

$$f(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}), \quad (4.74)$$

где $P_1 = b$; $P_2 = a_1$; $P_3 = d_0$; $P_4 = a_2$; $P_5 = i$; $P_6 = P_c$; $P_7 = U_p$ $P_8 = U_{акт}$;
 $P_9 = \Theta$; $P_{10} = r_0$; $P_{11} = U_c$.

Уровни варьирования параметров аппарата: $(-)P_1=(-)P_{к11}=0,006$; $(+)P_1=(+)P_{к11}=0,007$; $(-)P_{11}=(-)P_{к12}=14$; $(+)P_{11}=(+)P_{к12}=21$.

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

$$\pi'_{рн} = f_5(\pi'_1, \pi'_2, \pi'_3, \pi'_4, \pi'_5), \quad (4.75)$$

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

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

$$\pi'_{рн} = f_5(\pi'_1, \pi'_2, \pi'_3, \pi'_4, \pi'_5) = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i \pi_i + \sum_{j=2}^5 b_{ij} \pi_i \pi_j. \quad (4.76)$$

Эффективность акусто-магнитной обработки оценивалась по значению водородного показателя. Для получения линейной математической модели процесса была реализован полный факторный эксперимент 2^5 .

Основные уровни и интервалы варьирования факторов выбирались на основании априорной информации о процессе. Обозначим условно верхний, нижний уровни, соответственно знаками «+», «-». Матрица планирования и результаты реализации опытов приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 Уровни и кодированные обозначения опытов

Верхний уровень (+)	0,007	21
нижний уровень (-)	0,006	14
кодированные обозначения	$P_{к11}$	$P_{к12}$

Все опыты были проведены рандомизированно. После получения результатов опытов была проведена статистическая обработка результатов. Для определения точечных оценок закона распределения, были исключены грубые погрешности в результатах измерений, для чего использовался критерий Шарлье.

Результативные и факторные признаки для линейной модели представлены

в таблице 4.6.

Таблица 4.6 Результативные и факторные признаки для линейной модели с использованием критериев подобия

π'_{PH}	π'_1		π'_2		π'_3		π'_4		π'_5	
	P_{K11}	P_{K12}	P_{11}	P_{12}	P_{11}	P_{12}	P_{11}	P_{12}	P_{11}	P_{12}
5,3	$\pi'_{11}=0,8$		$\pi'_{21}=0,9739$		$\pi'_{31}=1,658$		$\pi'_{41}=0,116$		$\pi'_{51}=1,103$	
	$(-)P_{K11}$	$(-)P_{K12}$	$(-)P_{11}$	$(-)P_{12}$	$(-)P_{11}$	$(-)P_{12}$	$(-)P_{11}$	$(-)P_{12}$	$(-)P_{11}$	$(-)P_{12}$
5,7	$\pi'_{12}=0,93$		$\pi'_{22}=0,9421$		$\pi'_{32}=1,658$		$\pi'_{42}=0,106$		$\pi'_{52}=1,095$	
	$(+)P_{11}$	$(-)P_{12}$	$(+)P_{11}$	$(-)P_{12}$	$(+)P_{11}$	$(-)P_{12}$	$(+)P_{11}$	$(-)P_{12}$	$(+)P_{11}$	$(-)P_{12}$
5,5	$\pi'_{13}=0,8$		$\pi'_{23}=1,4607$		$\pi'_{33}=3,73$		$\pi'_{43}=0,074$		$\pi'_{53}=1,103$	
	$(-)P_{11}$	$(+)P_{12}$	$(-)P_{11}$	$(+)P_{12}$	$(-)P_{11}$	$(+)P_{12}$	$(-)P_{11}$	$(+)P_{12}$	$(-)P_{11}$	$(+)P_{12}$
5,8	$\pi'_{14}=0,93$		$\pi'_{24}=1,4131$		$\pi'_{34}=3,73$		$\pi'_{44}=0,068$		$\pi'_{54}=1,095$	
	$(+)P_{11}$	$(+)P_{12}$	$(+)P_{11}$	$(+)P_{12}$	$(+)P_{11}$	$(+)P_{12}$	$(+)P_{11}$	$(+)P_{12}$	$(+)P_{11}$	$(+)P_{12}$

Для системы нормальных уравнений в матричном виде запишем некоторые матрицы и соотношения между ними:

1) матрица факторных признаков (π'):

$$\pi' = \begin{bmatrix} 1 & 0,800 & 0,9739 & 1,658 & 0,116 & 1,103 \\ 1 & 0,930 & 0,9421 & 1,658 & 0,106 & 1,095 \\ 1 & 0,800 & 1,4607 & 3,730 & 0,074 & 1,103 \\ 1 & 0,930 & 1,4131 & 3,730 & 0,068 & 1,095 \end{bmatrix}; \quad (4.77)$$

2) транспонированная матрица факторных признаков:

$$\pi'^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,800 & 0,930 & 0,800 & 0,930 \\ 0,974 & 0,942 & 1,461 & 1,413 \\ 1,658 & 1,658 & 3,730 & 3,730 \\ 0,116 & 0,106 & 0,074 & 0,068 \\ 1,103 & 1,095 & 1,103 & 1,095 \end{bmatrix}; \quad (4.78)$$

3) перемножим матрицы π'^T и π' и получим

$$\pi'^T \pi' = \begin{bmatrix} 3,010 & 4,138 & 9,321 & 0,314 & 3,801 \\ 4,138 & 5,967 & 13,896 & 0,417 & 5,264 \\ 9,321 & 13,896 & 33,324 & 0,898 & 11,843 \\ 0,314 & 0,417 & 0,898 & 0,035 & 0,400 \\ 3,801 & 5,264 & 11,843 & 0,400 & 4,831 \end{bmatrix}; \quad (4.79)$$

4) найдём обратную матрицу $(\pi'^T * \pi')^{-1}$ (корреляционную)[104]:

$$(\pi'^T \pi')^{-1} = \begin{bmatrix} 8,718 \cdot 10^{13} & 1,886 \cdot 10^{14} & -2,921 \cdot 10^{13} & 7,449 \cdot 10^{14} & -2,642 \cdot 10^{14} \\ 1,886 \cdot 10^{14} & 4,08 \cdot 10^{14} & -6,319 \cdot 10^{13} & 1,612 \cdot 10^{15} & -5,715 \cdot 10^{14} \\ -2,921 \cdot 10^{13} & -6,319 \cdot 10^{13} & 9,786 \cdot 10^{12} & -2,496 \cdot 10^{14} & 8,851 \cdot 10^{13} \\ 7,449 \cdot 10^{14} & 1,612 \cdot 10^{15} & -2,496 \cdot 10^{14} & 6,366 \cdot 10^{15} & -2,258 \cdot 10^{15} \\ -2,642 \cdot 10^{14} & -5,715 \cdot 10^{14} & 8,851 \cdot 10^{13} & -2,258 \cdot 10^{15} & 8,006 \cdot 10^{14} \end{bmatrix}; \quad (4.80)$$

5) запишем матрицу-столбец результативного признака:

$$\pi'_{\text{рн}} = \begin{bmatrix} 5,3 \\ 5,7 \\ 5,5 \\ 5,8 \end{bmatrix}; \quad (4.81)$$

6) умножим транспонированную матрицу π'^T на матрицу столбец результативного признака

$$\pi'^T \pi'_{\text{рн}} = \begin{bmatrix} 2,463 \\ 3,413 \\ 7,713 \\ 0,257 \\ 3,121 \end{bmatrix}; \quad (4.82)$$

7) найдём матрицу-столбец параметров с помощью обратной матрицы

$$(\pi'^T \pi')^{-1} \pi'^T \pi'_{\text{рн}} = \begin{bmatrix} 0,450 \\ -0,024 \\ 0,035 \\ 0,280 \\ 0,133 \end{bmatrix}. \quad (4.83)$$

При всех производимых преобразованиях и действиях с матрицами следует иметь в виду, что матрица $\pi'^T \pi'$ должна быть невырожденной, а это возможно в случае, если $\pi'_1, \pi'_2, \pi'_3, \dots, \pi'_k$ линейно независимы.

Если факторные признаки при парной корреляции дают высокий коэффициент корреляции, то один из них исключается из рассмотрения.

В соответствии с матрицей планирования проведены опыты (расчеты), и определено критериальное уравнение регрессии связывающее водородный показатель с протекающими процессами в акусто-магнитном поле в виде:

$$\pi'_{\text{рн}} = 0,09 + 0,45\pi'_1 - 0,024\pi'_2 + 0,035\pi'_3 + 0,28\pi'_4 + 0,133\pi'_5. \quad (4.84)$$

Проведённый статистический анализ результатов эксперимента выявил однородности дисперсии опытов, дисперсии воспроизводимости эксперимента. Средняя относительная ошибка аппроксимации:

$$\bar{e}_{\text{откл}} = 0,87 \% . \quad (4.85)$$

Полученное значение ошибки менее 5% демонстрирует высокий уровень точности построенной модели. По результатам проверки модели на адекватность и точность принимается решение о возможности ее практического использования.

Для подготовки к проведению производственных испытаний акусто-магнитных аппаратов, предназначенных для установки в систему геотермального отопления был проведён ряд опытов, для установления зависимости между выбранными после ПРЕСС-процедуры [180] критериями подобия и противонакипным эффектом. Опыты проводились рандомизированно. Методика расчёта устанавливаемых на лабораторный стенд акусто-магнитных аппаратов не менялась в зависимости от того, какой солевой раствор обрабатывался, гидропонный или геотермальная вода.

Для проведения ПРЕСС-процедуры были составлены уравнения всех возможных регрессий для коэффициентов подобия акусто-магнитных аппаратов, имеющих стандартные типоразмеры ферритовых колец (Таблица 4.7). Ферритовые кольца выбирались следующим образом. Из таблицы полипропиленовых труб для горячей воды, рассчитанных на давление до десяти атмосфер, были выбраны размеры труб, обеспечивающих водоёмкость в диапазоне 0,5 – 3 л/мин (диапазон задан исходя из оптимальной скорости течения воды в рабочем зазоре акусто-магнитного аппарата). Это трубы в диапазоне 32–75 мм наружного диаметра. Далее по таблицам стандартных типоразмеров ферритовых колец были выбраны ферритовые кольца, подходящие по размерам для аппаратов, у которых внутренний диаметр соответствует внешнему диаметру выбранных труб.

В результате выбора было принято решение исследовать акусто-магнитные аппараты с ферромагнитными кольцами, подходящими к трубе с внешним диаметром 32 мм. В итоге ферритовые кольца имели следующие размеры: 64x40x9,7 мм; 64x40x14 мм; 75x46x12 мм; 75x40x16,8 мм; 125x80x12мм. Для организации планирования эксперимента были изготовлены пять акусто-магнитных аппаратов, имеющих размеры ферритовых колец входящими в интервал варьирования габаритных коэффициентов подобия. Для каждого акусто-магнитного аппарата про-

ведены опыты по определению противонакипного эффекта, и вычислены все коэффициенты подобия.

Таблица 4.7 Результаты ПРЕСС – процедуры

п 62	п 63	п 64	п 65	п 60	п 54	п 57	п 67	п 61	Ошибка e	
x	x	x	x	x	x	x	x	x	1,679	Факторы
x	x	x	x	x	x	x			0,534	Факторы
x	x	x	x	x					0,786	Факторы
x	x	x	x						1,899	Факторы
x	x	x	x						2,645	Факторы
x	x								1,77	Факторы
x		x							1,822	Факторы
x			x						1,705	Факторы
x				x					0,962	Факторы
x					x				0,911	Факторы
x						x			1,946	Факторы
	x	x							4,88	Факторы
	x		x						3,28	Факторы
	x			x					2,796	Факторы
			x	x					0,937	Факторы
			x		x				1,981	Факторы
			x			x			1,701	Факторы
				x	x				0,782	Факторы
				x		x			0,964	Факторы
x	x	x	x		x	x			0,178	Факторы
x	x	x		x	x	x			0,337	Факторы
x	x		x	x	x	x			0,211	Факторы
x		x	x	x	x	x			0,422	Факторы
	x	x	x	x	x	x			0,422	Факторы

Для выявления значимых коэффициентов проведена ПРЕСС-процедура. Результаты ПРЕСС-процедуры (модели, имеющие относительную ошибку аппроксимации менее 5 процентов) представлены в таблице 4.7. Из представленной таблицы видно, что адекватную модель дают 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:

$$\xi_{\text{вп}} = f_{\text{п}}(\pi_{62}, \pi_{63}, \pi_{64}, \pi_{65}, \pi_{60}, \pi_{54}, \pi_{57}). \quad (4.86)$$

В ходе проведения экспериментов были зафиксированы следующие характеристики:

- скорость движения воды внутри трубы диаметром 32 мм ($v_{32\text{тр}} = 1$ м/с);
- температура обрабатываемой геотермальной воды ($T_{\text{воды}} = 70^\circ\text{C}$).

Каждый изготовленный аппарат был установлен сначала на трубу с внутренним диаметром $D_{32\text{вн}} = 26$ мм, а затем с внутренним диаметром $D_{32\text{вн}} = 21,2$ мм. При этом расход воды изменялся соответственно $Q_{\text{воды}} = 0,5300$ л/с и $Q_{\text{воды}} = 0,3529$ л/с.

В таблице 4.8 для каждого размера ферритового кольца представлены вычисленные коэффициенты подобия и полученный на опыте результирующий признак – противонакипный эффект.

Таблица 4.8 Значения коэффициентов подобия и результирующего противонакипного эффекта

0,064*0,009	26	3,300	0,810	0,700	1,030	1,090	0,070	1,660	0,900	0,906
0,064*0,009	21,2	3,333	0,808	0,700	1,025	1,089	0,070	1,658	0,910	0,904
0,075*0,012	26	3,200	0,830	0,740	0,950	1,120	0,060	1,560	0,870	0,864
0,075*0,012	21,2	3,172	0,827	0,739	0,953	1,116	0,059	1,559	0,860	0,867
0,075*0,017	26	2,290	0,960	0,500	0,750	1,090	0,050	1,030	0,880	0,878
0,075*0,017	21,2	2,285	0,960	0,500	0,749	1,090	0,045	1,028	0,870	0,871
0,064*0,014	26	3,300	1,170	0,700	0,870	1,180	0,060	1,660	0,900	0,894
0,064*0,014	21,2	3,333	1,167	0,700	0,869	1,181	0,062	1,658	0,890	0,895
0,125*0,08	26	3,600	0,530	0,850	1,120	1,140	0,050	1,790	0,910	0,909
0,125*0,08	21,2	3,558	0,532	0,852	1,116	1,137	0,049	1,794	0,900	0,897
Размер кольца	$D_{32\text{вн}}$	$\pi 62$	$\pi 63$	$\pi 64$	$\pi 65$	$\pi 60$	$\pi 54$	$\pi 57$	$\xi_{\text{рп}}$	$\hat{\xi}_{\text{рп}}$

Методом наименьших квадратов составлена система нормальных уравнений и определено критериальное уравнение регрессии:

$$\begin{aligned} \xi_{\text{рп}} = & 0,4244 + 0,3581\pi'_{\text{н1}} + 0,8797\pi_{\text{н2}} + 0,127\pi'_{\text{н3}} + 1,6\pi'_{\text{н4}} - \\ & - 1,1325\pi'_{\text{н5}} - 3,017\pi'_{\text{н6}} - 1,026\pi'_{\text{н7}}. \end{aligned} \quad (4.87)$$

Проверим значимость коэффициентов регрессии. Для этого определим дисперсию воспроизводимости:

$$S_{\text{уост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\xi_{\text{рп}} - \hat{\xi}_{\text{рп}})^2}{n-k-1} = 0,00002. \quad (4.88)$$

Для выполнения условия значимости найдём среднее квадратическое от-

клонение коэффициентов уравнения регрессии β_i по формуле:

$$S_{b_j} = S_{\text{уст}} \sqrt{[(X^T X)^{-1}]_{j,j}}. \quad (4.89)$$

Вычислим среднеквадратическое отклонение коэффициентов β_i используя элементы $(X^T X)^{-1}_{i,i}$ обратной матрицы $(X^T X)^{-1}$:

$$\begin{aligned} S_{b_0} &= 0,4271, & S_{b_1} &= 0,2073, & S_{b_2} &= 0,3213, & S_{b_3} &= 0,1444, \\ S_{b_4} &= 0,4286, & S_{b_5} &= 0,8145, & S_{b_6} &= 2,2905, & S_{b_7} &= 0,4278. \end{aligned} \quad (4.90)$$

В качестве критерия проверки статистической гипотезы: $H_0: \beta_j = 0$ (коэффициент β_j незначим); $H_1: \beta_j \neq 0$ (коэффициент β_j значим) примем случайную величину

$$T_{\beta_j} = \frac{\beta_j}{S_{b_j}}, \quad (4.91)$$

которая при справедливости гипотезы H_0 имеет распределение Стьюдента с n -м степенями свободы. Следовательно, коэффициент β_j значимо отличается от нуля на уровне значимости α , если

$$|T_{\beta_j}| > t_{\alpha;m}. \quad (4.92)$$

Расчитаем доверительный интервал коэффициентов регрессии:

$$t_{\alpha;m} = 2,262. \quad (4.93)$$

$$\begin{aligned} |T_{\beta_0}| &= 0,9937 < 2,2622; & |T_{\beta_1}| &= 1,7276 \leq 2,2622; & |T_{\beta_2}| &= 2,7377 \geq 2,2622; \\ |T_{\beta_3}| &= 0,8792 \leq 2,2622; & |T_{\beta_4}| &= 3,7339 \geq 2,2622; & |T_{\beta_5}| &= 1,3903 \leq 2,2622; \\ |T_{\beta_6}| &= 1,3172 \leq 2,2622; & |T_{\beta_7}| &= 2,3995 \geq 2,2622. \end{aligned} \quad (4.94)$$

Как можно видеть, из условия (4.94), некоторые коэффициенты оказались незначимыми.

Коэффициенты $\pi_{62}, \pi_{63}, \pi_{65}, \pi_{57}$ оказались значимыми. Однако, незначимые коэффициенты при узких пределах изменения фактора в эксперименте могут оказывать малое влияние на параметр оптимизации, поэтому полученные данные нуждаются в подтверждении.

Есть возможность выбора следующих решений, позволяющих исследовать значимость коэффициентов регрессии: перенести центр плана, изменить интервал

варьирования, отсеять незначимые факторы, провести параллельные опыты, достроить план. Также есть возможность движения по градиенту, а если область оптимума близка, то реализовать план второго порядка или закончить исследование. Было принято решение изучить область оптимума посредством отсеяния 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 кольцом 64x40x9,7мм. Процесс выделения солей из воды, обработанной физическими полями, представим зависимостью:

$$\xi_{pp} = f(P_1, P_2, P_3), \quad (4.95)$$

где $P_1 = n$; $P_2 = f$, $P_3 = U$.

Уровни варьирования параметров аппарата (таблица 4.9):

$$\begin{aligned} (-)P_{n1} &= 610; & (0)P_{n1} &= 915; & (+)P_{n1} &= 1220; \\ (-)P_{n2} &= 25958 \text{ Гц}; & (0)P_{n2} &= 27548 \text{ Гц}; & (+)P_{n2} &= 29138 \text{ Гц}; \\ (-)P_{n3} &= 12 \text{ В}; & (0)P_{n3} &= 24 \text{ В}; & (+)P_{n3} &= 36 \text{ В}. \end{aligned}$$

Таблица 4.9 Уровни и кодированные обозначения опытов

Верхний уровень (+)	1220	29100	36
Основной уровень (0)	915	27500	24
Нижний уровень (-)	610	25900	12
кодированные обозначения	P_{n1}	P_{n2}	P_{n3}

Кодированные факторы имеют вид:

$$P'_{n1} = \frac{P_{n1} - P_{n1(0)}}{\Delta P_1} = \frac{P_{n1} - 915}{305};$$

$$P'_{n2} = \frac{P_{n2} - P_{n2(0)}}{\Delta P_2} = \frac{P_{n2} - 27500}{1600};$$

$$P'_{n3} = \frac{P_{n3} - P_{n3(0)}}{\Delta P_3} = \frac{P_{n3} - 24}{12}. \quad (4.96)$$

Изучение области оптимума представлено в таблице 4.10.

Таблица 4.10 Результативные и факторные признаки для линейной модели

Кодированные обозначения	P'_{n1}	P'_{n2}	P'_{n3}	$\xi_{рп1}$	$\xi_{рп2}$	$\bar{\xi}_{рп} = \frac{\xi_{рп1} + \xi_{рп2}}{2}$
Опыты:						
1	(-)	(-)	(-)	0,840	0,870	0,855
2	(+)	(-)	(-)	0,870	0,892	0,881
3	(-)	(+)	(-)	0,925	0,939	0,932
4	(+)	(+)	(-)	0,964	0,976	0,970
5	(-)	(-)	(+)	0,908	0,912	0,910
6	(+)	(-)	(+)	0,923	0,917	0,920
7	(-)	(+)	(+)	0,900	0,915	0,908
8	(+)	(+)	(+)	0,980	0,990	0,985

$$S_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\xi_{рп} - \bar{\xi}_{рп})^2}{m-1} = \frac{(0,83-0,85)^2 + (0,87-0,85)^2}{1} = 4,5 \cdot 10^{-4}. \quad (4.97)$$

Аналогично $S_2^2 = 2,42 \cdot 10^{-4}$; $S_3^2 = 0,98 \cdot 10^{-4}$; $S_4^2 = 0,72 \cdot 10^{-4}$; $S_5^2 = 0,08 \cdot 10^{-4}$; $S_6^2 = 0,18 \cdot 10^{-4}$; $S_7^2 = 1,25 \cdot 10^{-4}$; $S_8^2 = 0,5 \cdot 10^{-4}$.

Процесс воспроизводим, так как выполняется неравенство:

$$G_{max} = \frac{S_{u_{max}}^2}{\sum_{u=1}^n S_u^2} = \frac{0,00045}{0,00105} = 0,428 < 0,6798. \quad (4.98)$$

При этом дисперсия воспроизводимости:

$$S_{\xi_{рп}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^n S_u^2}{n} = \frac{0,00105}{8} = 0,00013. \quad (4.99)$$

Так как процесс опытов воспроизводим, определяем значение коэффициентов регрессии по результатам опытов:

$$\beta_0 = \frac{\sum_{u=1}^n \bar{\xi}_{рп}}{n} = 0,92. \quad (4.100)$$

Оценка параметра

$$\beta_1 = \frac{\sum_{u=1}^n P'_{n1u} \bar{\xi}_{рп}}{n} = 0,01894, \quad (4.101)$$

$$\beta_2 = \frac{\sum_{u=1}^n P'_{n2u} \bar{\xi}_{рп}}{n} = 0,02856, \quad (4.102)$$

$$\beta_3 = \frac{\sum_{u=1}^n P'_{n3u} \bar{\xi}_{\text{рп}}}{n} = 0,01056. \quad (4.103)$$

Из полученных на опыте результатов формируется полином

$$\xi_{\text{рп}} = 0,92 + 0,01894P'_{n1} + 0,02856P'_{n2} + 0,01056P'_{n3}. \quad (4.104)$$

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

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\xi_{\text{рп}}}^2_{\text{ост}}}{S_{\xi_{\text{рп}}}^2} = \frac{0,00065}{0,00013} = 4,918 \geq F_{(0.05; f_{ад}; f_u)} = 3,84, \quad (4.105)$$

$$S_{\xi_{\text{рп}}}^2_{\text{ост}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\xi_{\text{рп}i} - \hat{\xi}_{\text{рп}i})^2}{n-l} = 0,00065. \quad (4.106)$$

Итак, 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 о построении плана второго порядка для описания области оптимума. Для этого воспользовались ортогональным планом второго порядка. Результаты одной из серии опытов были использованы в качестве ядра планирования (таблица 4.11).

Таблица 4.11 Данные для определения условий опыта

Основной уровень	2745	27500	24
Звёздные точки			
- d(-1,215)	1633,4	25556	9,42
+d(1,215)	3856,8	29444	38,58
кодированные обозначения	P_{n1}	P_{n2}	P_{n3}

Для достроения плана до плана второго порядка, были проведены опыты на расстоянии d от центра и на нулевом уровне. Данные для определения условий опыта представлены в таблице 4.12.

Определение значений коэффициентов регрессии по результатам опытов происходит по формуле

$$\beta'_0 = \frac{\sum_{u=1}^n \xi_{\text{рп}}}{N} = 0,927. \quad (4.107)$$

Оценка параметра

$$\beta_1 = \frac{\sum_{u=1}^n P'_{n1u} \xi_{pp}}{10,9544} = 0,004, \quad (4.108)$$

$$\beta_2 = \frac{\sum_{u=1}^n P'_{n2u} \xi_{pp}}{10,9544} = 0,015, \quad (4.109)$$

$$\beta_3 = \frac{\sum_{u=1}^n P'_{n3u} \xi_{pp}}{10,9544} = 0,048, \quad (4.110)$$

$$\beta_{11} = \frac{\sum_{u=1}^n P'_{n1u}{}^2 \xi_{pp}}{4,364} = -0,017, \quad (4.111)$$

$$\beta_{22} = \frac{\sum_{u=1}^n P'_{n2u}{}^2 \xi_{pp}}{4,364} = -0,007, \quad (4.112)$$

$$\beta_{33} = \frac{\sum_{u=1}^n P'_{n3u}{}^2 \xi_{pp}}{4,364} = -0,017, \quad (4.113)$$

$$\beta_{12} = \frac{\sum_{u=1}^n P'_{n1u} P'_{n2u} \xi_{pp}}{8} = -0,009, \quad (4.114)$$

$$\beta_{13} = \frac{\sum_{u=1}^n P'_{n1u} P'_{n3u} \xi_{pp}}{8} = 0,005, \quad (4.115)$$

$$\beta_{23} = \frac{\sum_{u=1}^n P'_{n2u} P'_{n3u} \xi_{pp}}{8} = 0,013. \quad (4.116)$$

Таблица 4.12 Условия и результаты опытов по плану второго порядка

№	P'_{n0}	P'_{n1}	P'_{n2}	P'_{n3}	$\frac{P'_{n1}}{P'_{n2}}$	$\frac{P'_{n1}}{P'_{n3}}$	$\frac{P'_{n2}}{P'_{n3}}$	$\frac{(P'_{n1})^2}{-11/15}$	$\frac{(P'_{n2})^2}{-11/15}$	$\frac{(P'_{n3})^2}{-11/15}$	ξ_{pp}
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	4/15	4/15	4/15	0,89
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	4/15	4/15	4/15	0,87
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	4/15	4/15	4/15	0,82
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	4/15	4/15	4/15	0,86
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	4/15	4/15	4/15	0,95
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	4/15	4/15	4/15	0,98
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	4/15	4/15	4/15	0,96
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	4/15	4/15	4/15	0,99
9	+1	-1,215	0	0	0	0	0	23/30	-11/15	-11/15	0,95
10	+1	+1,215	0	0	0	0	0	23/30	-11/15	-11/15	0,92
11	+1	0	-1,215	0	0	0	0	-11/15	23/30	-11/15	0,94
12	+1	0	+1,215	0	0	0	0	-11/15	23/30	-11/15	0,96
13	+1	0	0	-1,215	0	0	0	-11/15	-11/15	23/30	0,89
14	+1	0	0	+1,215	0	0	0	-11/15	-11/15	23/30	0,98
15	+1	0	0	0	0	0	0	-11/15	-11/15	-11/15	0,95

При этих данных уравнение может быть записано в виде

$$\begin{aligned}\xi_{\text{pp}} = & 0,927 + 0,004P'_{n1} + 0,015P'_{n2} + 0,048P'_{n3} - 0,009P'_{n1}P'_{n2} + \\ & + 0,005P'_{n1}P'_{n3} + 0,013P'_{n2}P'_{n3} - 0,017\left(P_{n1}^2 - \frac{11}{15}\right) - \\ & - 0,007\left(P_{n2}^2 - \frac{11}{15}\right) - 0,017\left(P_{n3}^2 - \frac{11}{15}\right).\end{aligned}\quad (4.117)$$

Для перехода к обычной записи воспользуемся формулой (4.25)

$$\beta_0 = 0,927 - \frac{11}{15}(-0,017 - 0,007 - 0,017) = 0,957. \quad (4.118)$$

Запишем уравнение (4.117) в привычном виде

$$\begin{aligned}\xi_{\text{pp}} = & 0,957 + 0,004P'_{n1} + 0,015P'_{n2} + 0,048P'_{n3} - 0,009P'_{n1}P'_{n2} + \\ & + 0,005P'_{n1}P'_{n3} + 0,013P'_{n2}P'_{n3} - 0,017(P_{n1}^2) - 0,007(P_{n2}^2) - 0,017(P_{n3}^2).\end{aligned}\quad (4.119)$$

Проверим адекватность модели (4.119), для чего рассчитаем дисперсию по формуле (4.21). Подставим значения, записанные в первой строке таблицы 4.13 в формулу (4.119), получим:

$$\begin{aligned}\xi_{\text{pp1}} = & 0,957 - 0,004 - 0,015 - 0,048 - 0,009 + 0,005 + 0,013 - 0,017\left(\frac{4}{15}\right) - \\ & - 0,007\left(\frac{4}{15}\right) - 0,017\left(\frac{4}{15}\right) = 0,89.\end{aligned}\quad (4.120)$$

Аналогичные расчеты выполняются по всем строкам таблицы 4.12.

Значение критерия Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{0,0044}{0,0024} = 1,83 \leq F_{(0,05; f_{ад}; f_u)} = 6,256. \quad (4.121)$$

Таким образом, модель адекватна экспериментальным данным.

Найдём экстремум функции (4.119) на множестве P_m^n . Необходимые условия экстремума первого порядка:

$$\frac{\partial f}{\partial P'_{n1}} = 0,004 - 0,034P'_{n1} - 0,009P'_{n2} + 0,005P'_{n3} = 0; \quad (4.122)$$

$$\frac{\partial f}{\partial P'_{n2}} = 0,015 - 0,009P'_{n1} - 0,014P'_{n2} + 0,013P'_{n3} = 0; \quad (4.123)$$

$$\frac{\partial f}{\partial P'_{n3}} = 0,048 + 0,005P'_{n1} + 0,013P'_{n2} - 0,034P'_{n3} = 0. \quad (4.124)$$

В результате решения системы получим: $P'_{n1} = -0,546$; $P'_{n2} = 4,122$;

$$P'_{n3} = 2,908 .$$

$$\frac{\partial^2 f}{(\partial P'_{n1})^2} = -0,034; \quad \frac{\partial^2 f}{\partial P'_{n1} \partial P'_{n2}} = -0,009; \quad \frac{\partial^2 f}{\partial P'_{n1} \partial P'_{n3}} = 0,005; \quad (4.125)$$

$$\frac{\partial^2 f}{(\partial P'_{n2})^2} = -0,014; \quad \frac{\partial^2 f}{\partial P'_{n2} \partial P'_{n3}} = 0,013; \quad \frac{\partial^2 f}{\partial P'_{n2} \partial P'_{n1}} = -0,009; \quad (4.126)$$

$$\frac{\partial^2 f}{(\partial P'_{n3})^2} = -0,034; \quad \frac{\partial^2 f}{\partial P'_{n3} \partial P'_{n1}} = 0,005; \quad \frac{\partial^2 f}{\partial P'_{n3} \partial P'_{n2}} = 0,013. \quad (4.127)$$

Проверим выполнение достаточных и необходимых условий экстремума

Матрица Гессе имеет вид $H(\xi_{\text{рп}}) = \begin{pmatrix} -0,034 & -0,009 & 0,005 \\ -0,009 & -0,014 & 0,013 \\ 0,005 & 0,013 & -0,034 \end{pmatrix}$. Так как,

$$\Delta_1 = -0,034 < 0, \quad (4.128)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} -0,034 & -0,009 \\ -0,009 & -0,014 \end{vmatrix} = 3,27 \cdot 10^{-4} > 0, \quad (4.129)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} -0,034 & -0,009 & 0,005 \\ -0,009 & -0,014 & 0,013 \\ 0,005 & 0,013 & -0,034 \end{vmatrix} = -8,504 \cdot 10^{-6} < 0, \quad (4.130)$$

то достаточные условия экстремума выполняются. Проверим необходимые условия второго порядка. Так как все главные миноры четного порядка неотрицательны, а все миноры нечетного порядка неположительны, то можно сделать вывод о том, что в исследуемых стационарных точках имеется максимум.

Экстремум достигается в точке с координатами P'_{n1} , P'_{n2} , P'_{n3} , при этом натуральные значения факторов могут быть найдены из соотношений

$$\begin{aligned} P_{n1} &= P'_{n1} \cdot 305 + 915 = 748,477; & P_{n2} &= P'_{n2} \cdot 1600 + 27500 = 34100; \\ P_{n3} &= P'_{n3} \cdot 12 + 24 = 58,9. \end{aligned} \quad (4.131)$$

Для проверки полученных значений глобального максимума процесса акусто-магнитной обработки геотермальной воды было вычислено значение функции по модели (4.119):

$$\begin{aligned} \xi_{\text{рп}} &= 0,957 + 0,004 \cdot (-0,546) + 0,015 \cdot 4,122 + 0,048 \cdot 2,908 - 0,009 \cdot \\ & \quad (-0,546) \cdot 4,122 + 0,005 \cdot (-0,546) \cdot 2,908 + 0,013 \cdot 4,122 \cdot 2,908 - \\ & \quad 0,017(-0,546^2) - 0,007(4,122^2) - 0,017(2,908^2) = 1. \end{aligned} \quad (4.132)$$

Следующим шагом будет определение угла поворота координат в новом центре по соотношению

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\beta_{12}}{\beta_{11} - \beta_{22}} = \frac{-0,009}{-0,017 - (-0,007)} = 0,9, \quad (4.133)$$

где α – угол поворота осей.

Если знак угла поворота отрицательный, то поворот осей происходит по часовой стрелке, а если положительный, то наоборот.

Коэффициенты регрессии в канонической форме определяются из уравнений:

$$\begin{aligned} B_{11} &= \beta_{11} \cos^2 \alpha + \beta_{12} \sin \alpha \cos \alpha + \beta_{22} \sin^2 \alpha = -0,019; \\ B_{22} &= \beta_{11} \sin^2 \alpha + \beta_{12} \sin \alpha \cos \alpha + \beta_{22} \cos^2 \alpha = -6,091 \cdot 10^{-3}; \\ B_{12} &= 2(\beta_{22} - \beta_{11}) \sin \alpha \cos \alpha + \beta_{12}(\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) = 0. \end{aligned} \quad (4.134)$$

Для построения линий двумерного сечения используется уравнение

$$1 = \frac{P_1^2}{-0,043/-0,019} + \frac{P_2^2}{-0,043/-6,091 \cdot 10^{-3}}; \frac{P_1^2}{2,296} + \frac{P_2^2}{7,06} = 1. \quad (4.135)$$

Точки кривых сечения находятся с помощью стандартного уравнения. На рисунке 4.7 представлены контуры кривых с равными значениями параметров оптимизации.

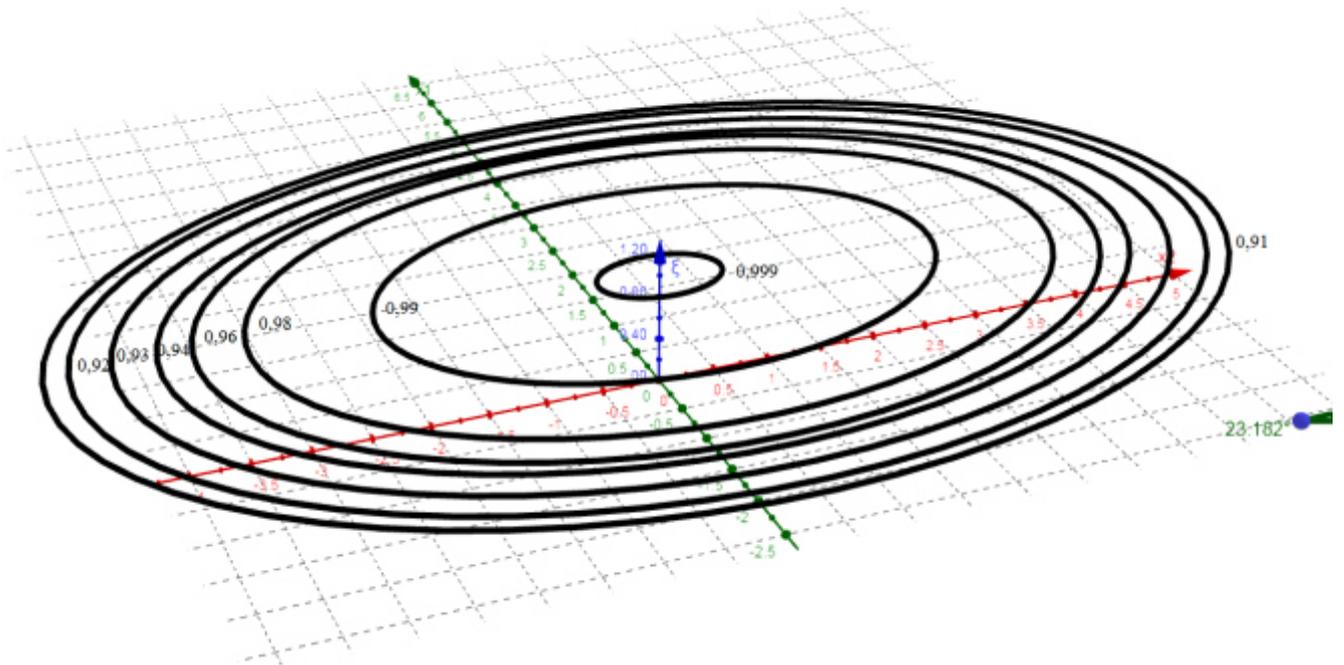


Рисунок 4.7 – Контурные кривые с равными значениями параметра оптимизации – эллипса

На основе проведенных лабораторных исследований была выбрана схема проведения эксперимента по безреагентной обработке геотермальных вод на основе теплотехнических, гидрогеотермических, термодинамических и технико-

экономических расчетов, с учетом химического состава и минерализации гидро-терм. При выборе схемы эксперимента было установлено, что термальная вода должна непосредственно подаваться в систему теплоснабжения, вода не подвергается (при пиковых температурах) дополнительному нагреву в котлах или теплообменниках.

Проектный расчет акусто-магнитного аппарата проходил на основании технического задания. Для проектирования были заданы технические требования к проектируемой конструкции, которые являлись исходными данными для расчета акусто-магнитного аппарата: частота питающего напряжения $f = 50$ Гц; номинальные напряжения питания 220;24;14 вольт; температура окружающей среды (воздуха) не более 35 °С; диаметр подающей трубы 159 мм; температура геотермальной воды 85 °С; режим работы постоянный; критерий оптимальности конструкции – минимальный объём.

Выбор конструкции акусто-магнитного аппарата и определение его основных размеров проводился при помощи составленных регрессионных критериальных уравнений, построенных при проведении экспериментов на стенде. Расчет проводился поэтапно.

На первом этапе расчет акусто-магнитного аппарата начинался с определения параметров рабочей зоны аппарата, так как конструктивно установка аппарата на трубу происходит посредством посадки с натягом. Из литературных источников [149] известно, что процесс безреагентной обработки воды будет эффективным, если будет обработано не менее одной трети проходящей по трубе воды.

Так как в подающей трубе (диаметр 159 мм) проходит большой объём воды (90 м³/час) под большим давлением (4 атм), то было принято решение произвести врезку в трубопровод (параллельно трубе) трубой диаметром $D_a = 76$ мм и на неё уже установить акусто-магнитный аппарат.

Из таблицы 4.13 подбираем тип трубы. Это труба полипропиленовая с наружным диаметром 75 мм, и внутренним диаметром $D_{тр.вн} = 50$ мм.

Таблица 4.13 Классификация диаметров полипропиленовых труб

Наружный диаметр, мм	PN10		PN20		PN30	
	Внутренний диаметр	Толщина стенки	Внутренний диаметр	Толщина стенки	Внутренний диаметр	Толщина стенки
16			10.6	2.7		
20	16.2	1.9	13.2	3.4	13.2	3.4
25	20.4	2.3	16.6	4.2	16.6	4.2
32	26.0	3.0	21.2	5.4	21.2	3.0
40	32.6	3.7	26.6	6.7	26.6	3.7
50	40.8	4.6	33.2	8.4	33.2	4.6
63	51.4	5.8	42	10.5	42	5.8
75	61.2	6.9	50	12.5	50	6.9
90	73.6	8.2	6	15		
110	90	10	73.2	18.4		

Скорость жидкости в трубопроводе рассчитывается по формуле:

$$v = \frac{4Q_c}{\pi D_{\text{тр.вн}}^2} = 0,41 \text{ м/с} . \quad (4.136)$$

Время прохождения жидкости через активную зону аппарата $\tau = 0,296 \text{ с}$.

Площадь проходного сечения воды в рабочем зазоре (для определения диаметра трубы, проходящей через рабочую зону аппарата обработки жидкости):

$$S_B = \frac{Q_c}{0,36vt} = \frac{0,00115}{0,36 \cdot 0,41} = 0,0078 \text{ м}^2 . \quad (4.137)$$

где $Q_p = 4,128 \text{ м}^3/\text{час}$ часовой расход воды ($Q_c = 0,00115 \text{ м}^3/\text{с}$);

$m = 1$ (число включённых в параллель рабочих зазоров);

Длина пути жидкости в активной зоне аппарата:

$$L = v\tau = 0,41 \cdot 0,296 = 0,12 \text{ м} . \quad (4.138)$$

Внешний диаметр трубы является внутренним диаметром акусто-магнитного аппарата. Соответственно для посадки с натягом необходим диаметр аппарата должен быть на 0,1 мм меньше внешнего диаметра трубы.

Внутренний диаметр корпуса

$$d_{\text{вн}} = \frac{S_{\text{вн}}}{\pi r} + r = 0,07515 \text{ м}, \quad (4.139)$$

$$r = 0,5 D_{\text{трубы}} \sqrt{D_{\text{трубы}}^2 - \frac{4S_{\text{в}}}{\pi}} = 0,04, \quad (4.140)$$

$$S_{\text{в}} = \frac{\pi D_{\text{трубы}}^2}{4} = 0,0044 \text{ м}^2. \quad (4.141)$$

После выбора внутреннего диаметра акусто-магнитного аппарата производится расчет акусто-магнитного аппарата, начиная с выбора рабочей частоты излучателя, на основе установленных опытным путем и рассчитанных по модели параметров. Рассчитав внутренний диаметр корпуса, находим из таблиц ферритовой сердечник с внутренним диаметром больше 76 мм. Этим требованиям удовлетворяет ферритовое кольцо М2000НМ, 125x80x12. Рассчитаем резонансную частоту выбранного ферритового кольца:

$$f = \frac{4760}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,05125} = \frac{4760}{0,322} = 14782 \text{ Гц}, \quad (4.142)$$

$$R_{\text{ср}} = \frac{R_{\text{нар}} + R_{\text{вн}}}{2} = \frac{0,0625 + 0,04}{2} = 0,0513. \quad (4.143)$$

По среднему диаметру определяем активную ширину кольца излучателя. Экспериментально установлено, что оптимальная ширина активной части b кольца лежит в пределах 15 – 20% величины среднего диаметра кольца излучателя $D_{\text{ср}}$:

$$b = (0,15 \div 0,2) D_{\text{ср}} = 0,20 \cdot 0,1025 = 0,0205 \text{ м}. \quad (4.144)$$

Высота выбранного ферритового кольца составляет 0,012 м, что примерно соответствует расчётному значению. Определяем наружный и внутренний диаметры колец излучателя:

$$D_{\text{вн}} = D_{\text{ср}} - \frac{b}{2} = 0,1025 - \frac{0,0205}{2} = 0,1025 - 0,01025 = 0,092, \quad (4.145)$$

$$D_{\text{нар}} = D_{\text{ср}} + \frac{b}{2} = 0,102 + 0,010 = 0,112. \quad (4.146)$$

Расчетные значения близки к реальным размерам кольца, поэтому в дальнейшем будем использовать реальные размеры выбранного кольца.

Сердечник акусто-магнитного аппарата характеризуется линейными размерами: $a = R_{\text{нар}} - R_{\text{вн}} = 0,063 - 0,040 = 0,023 \text{ м}$; $b = 0,012 \text{ м}$; $c = D_{\text{вн}} = d = 0,080 \text{ м}$.

Примем размер a в качестве базисного. Пользуясь рассчитанными критериями подобия $\pi_{н1} = \pi_{62} = 3,333$, $\pi_{н2} = \pi_{63} = 0,8$ проверим соответствие геометрического подобия:

$$\pi_{н1} = \pi_{62} = \frac{c}{a} = \frac{0,080}{0,023} = 3,556, \quad (4.147)$$

$$\pi_{н2} = \pi_{63} = \frac{b}{a} = \frac{0,012}{0,023} = 0,533, \quad (4.148)$$

$$\pi_{н3} = \pi_{64} = \frac{\pi_{н1} - \frac{d_0}{a}}{\pi_{н1}} = 0,850. \quad (4.149)$$

Коэффициент заполнения окна обмоткой $\pi_{н3}$ находится из выражения:

$$\pi_{н3} = \pi_{64} = \frac{\pi_{н1} - \frac{d_0}{a}}{\pi_{н1}} = 0,520. \quad (4.150)$$

Обобщенные геометрические параметры [18]:

$$S_c = \pi_{63} a^2 = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad (4.151)$$

$$S_0 = \frac{\pi}{4} (2 - \pi_{64}) \pi_{64} \pi_{62}^2 a^2 = 49,134 \cdot 10^{-4}. \quad (4.152)$$

Средняя длина одного витка для данного типоразмера ферритового кольца составила:

$$l_{\text{ср.обм}} = 0,069, \quad (4.153)$$

тогда длина провода в обмотках:

$$l_1 = n \cdot l_{\text{ср.обм}} = 208 \cdot 0,069 = 12 \text{ м}, \quad (4.154)$$

где число витков обмотки одной фазы:

$$n = \frac{40 \cdot U}{S_c} = 208 \text{ витков}. \quad (4.155)$$

Соответственно количество витков для трёх фаз аппарата 624 витка.

Ток, протекающий через аппарат:

$$i = \sqrt{i_{\text{акт}}^2 + i_{\text{реакт}}^2} = \sqrt{1,078^2 + (1,23 \cdot 10^{-2})^2} = 1,078 \text{ А}. \quad (4.156)$$

Удельные потери некоторых ферромагнитных материалов приведены в таблице 4.4.

Вычислим активную составляющую тока:

$$i_{\text{акт}} = i = \frac{m_c P_0}{E_{\text{об}}} = \frac{32 \cdot 0,472}{14} = 1,078 \text{ А}. \quad (4.157)$$

Масса магнитопровода вычисляется, исходя из его объема:

$$m_c = \frac{\pi}{4} k_c \rho_c (D_{\text{нар}}^2 - D_{\text{вн}}^2) \cdot h = 0,472 \text{ кг}, \quad (4.158)$$

$$k_c = \frac{d}{d_{\text{покр}}} = \frac{0,0064}{0,0068} = 0,941. \quad (4.159)$$

Реактивная составляющая тока определяется по формуле:

$$i_{\text{реакт}} = \frac{H l_{\text{маг.ср}}}{n_{\text{пер}}} = \frac{24 \cdot 0,322}{624} = \frac{7,72}{624} = 1,23 \cdot 10^{-2} \text{ А}, \quad (4.160)$$

$$l_{\text{маг.ср}} = \pi D_{\text{ср}} = 3,14 \cdot 0,1025 = 0,322. \quad (4.161)$$

Значение $H = 24 \text{ А/м}$ берется из таблицы 4.3.

Диаметр провода обмотки моделируем по формуле:

$$d_{\text{провода}} = 1,13 \sqrt{\frac{i}{j_m}} = 1,13 \sqrt{\frac{1,078}{3}} = 0,67 \text{ мм}, \quad (4.162)$$

где j_m – допустимая плотность тока по условиям теплоотвода, экспериментально установлено [107], что $j_m \leq 3 \text{ А/мм}^2$.

Выбирают ближайший диаметр провода (Приложение Г) в сторону уменьшения (0,67 мм). Изоляцию первичной обмотки производим микалентной бумагой толщиной 0,02мм в два сложения с половинным перекрытием.

Рассчитаем индуктивность одной фазы аппарата.

При $D_{\text{н}}/D_{\text{вн}} < 1,75$ применяется формула

$$L = \frac{4\mu h (D_{\text{нар}} - D_{\text{вн}}) \omega^2}{10^4 \cdot (D_{\text{нар}} + D_{\text{вн}})} = 62,820 \text{ мГн}. \quad (4.163)$$

Найдём значение P_c :

$$P_c = m_c P_o = 0,472 \cdot 32 = 15,104 \text{ Вт}, \quad (4.164)$$

$$r_0 = \frac{14}{1,078} = 12,980 \text{ Ом}. \quad (4.165)$$

Для уточнения реактивной составляющей тока удобно вычислить $i_{\text{реакт}}$ через индуктивность обмотки одной фазы акусто-магнитного аппарата:

$$i_{\text{реакт}} = \frac{E}{2\pi f L} = 0,0149 \text{ А}. \quad (4.166)$$

Ток, протекающий через аппарат:

$$i = \sqrt{i_{\text{акт}}^2 + i_{\text{реакт}}^2} = \sqrt{1,078^2 + (0,0149)^2} = 0,908 \text{ А}, \quad (4.167)$$

$$\pi_{H4} = \pi_{65} = \frac{P_c}{r_0 i^2} = \frac{15,104}{12,98 \cdot 0,908^2} = 1,1875 . \quad (4.168)$$

Критериальное уравнение геометрических параметров имеет вид:

$$\pi_{66} = f_1(\pi_{H1}, \pi_{H2}, \pi_{H3}, \pi_{H4}). \quad (4.169)$$

Вычислим температуру превышения ферритового кольца акусто-магнитного аппарата (3.76):

$$F = 2\pi(R_{\text{нар}}^2 - R_{\text{в}}^2) + 2\pi h(R_{\text{нар}} + R_{\text{в}}) = 0,7776, \quad (4.170)$$

$$\Theta - T_{\text{охл}} = \frac{r_0 i_1^2 + P_c}{\alpha_0 F - \chi r i_1^2} = \frac{30,208}{26,558} = 42,39, \quad (4.171)$$

$$\Theta = 42,39 + 21 = 63,39 \text{ } ^\circ\text{C} . \quad (4.172)$$

Коэффициент теплообмена является эмпирической величиной, числовое значение которой получено в процессе сравнения результатов испытаний акусто-магнитных аппаратов с теоретическими данными – $\alpha_0 = 35 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$. ТКС меди равен 0,01 1/К. Температура окружающей среды берётся 21°C.

$$\pi_{60} = \frac{(r_0 i^2 + P_c)}{(\Theta - T_{\text{охл}})(\alpha_0 F - \chi r_0 i^2)} = 1,137. \quad (4.173)$$

Амплитудное значение движущей силы определяется из выражения

$$\tilde{F} = 2\pi\sigma B_m Q, \quad (4.174)$$

где Q – площадь поперечного сечения стенки излучателя ($Q = \frac{1}{2} S_{\text{изл поверх}}$); $S_{\text{изл поверх}}$ – площадь излучающей поверхности, которая определяется из выражения:

$$S_{\text{изл поверх}} = D_{\text{вн}} \cdot \pi \cdot h = 0,003. \quad (4.175)$$

Сопротивление среды излучателю:

$$R_s = k \cdot \rho \cdot C \cdot S_{\text{изл поверх}} = 1020 \cdot 1500 \cdot 0,00301 \cdot 0,00001 = 0,046, \quad (4.176)$$

где k – безразмерный коэффициент, определяемый активной и реактивной составляющими сопротивления излучения [159].

Колебательная скорость на механическом выходе:

$$v = \frac{U R_{\text{в}}}{a k_m 4\pi n S} = 3279,080. \quad (4.177)$$

Амплитудное значение движущей силы определяется из выражения (4.174)

$$\tilde{F} = 2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot 10^{-4} \cdot 4,36 \cdot 0,0015 = 1,027 \cdot 10^{-4}, \quad (4.178)$$

$$Q = \frac{1}{2} S_{\text{изл. поверх}} = \frac{1}{2} \cdot D_{\text{вн}} \cdot \pi \cdot h = 0,0015, \quad (4.179)$$

$$\pi_{57} = \frac{v \tilde{F}}{U_i} = \frac{3279,087 \cdot 1,0027 \cdot 10^{-4}}{14 \cdot 1,078} = 1,790, \quad (4.180)$$

$$\pi_{54} = \frac{U_p}{U_{\text{акт}}} = 0,0478. \quad (4.181)$$

Вениковым В.А. сформулированы дополнительные положения, которые имеют значение при установлении подобия и моделировании электрических явлений. Согласно Веникову В.А., сложные системы, составленные из нескольких систем, соответственно подобных в отдельности, подобны, если соответственно подобны все их элементы, являющиеся общими для соответствующих систем, то есть если имеет место подобие граничных условий отдельных систем. Условия подобия, справедливые для линейных, изотропных и однородных систем, могут быть распространены и на нелинейные, анизотропные и неоднородные системы, а также на системы с гистерезисом, при дополнительном условии совпадения относительных характеристик проявления нелинейности, анизотропии неоднородности и гистерезиса. Абсолютно полного подобия, охватывающего все процессы двух сравниваемых явлений, добиться никогда не удастся. Для практических целей это совсем не обязательно. Теория подобия работает и в тех случаях, когда пропорциональность соблюдается не по всем, а только по наиболее важным величинам. При этом учитываются не все множители, определяющие подобие, а только их часть [38].

Для определения эффективности процесса акусто-магнитной обработки геотермальной воды были подставлены коэффициенты подобия в формулу модели (4.87):

$$\xi_{\text{рп}} = 0,4244 + 0,3581 \cdot 3,556 + 0,8797 \cdot 0,533 + 0,127 \cdot 0,52 + 1,6 \cdot 1,1875 - 1,1325 \cdot 1,137 - 3,017 \cdot 0,0478 - 1,026 \cdot 1,79 = 0,86. \quad (4.182)$$

Полученное значение эффективности акусто-магнитной обработки геотермальной воды было подтверждено на опыте, после трёхлетней эксплуатации на геотермальной скважине в ЗАО «Радуга».

4.4 Результаты полевого эксперимента в тепличном комплексе

Целью полевого эксперимента в тепличном комплексе ЗАО «Радуга» было проведение исследований по безреагентной обработке геотермальных вод, предназначенных для теплоснабжения тепличного комплекса.

Агротехнология выращивания овощей в теплице требует точного поддержания температурного режима. Для теплоснабжения тепличного комплекса ЗАО «Радуга» используются геотермальные источники. Обратная (нагреваемая) вода из теплицы подается в теплообменный блок. На рисунок 4.8 приведена принципиальная схема теплоснабжения тепличного комплекса.

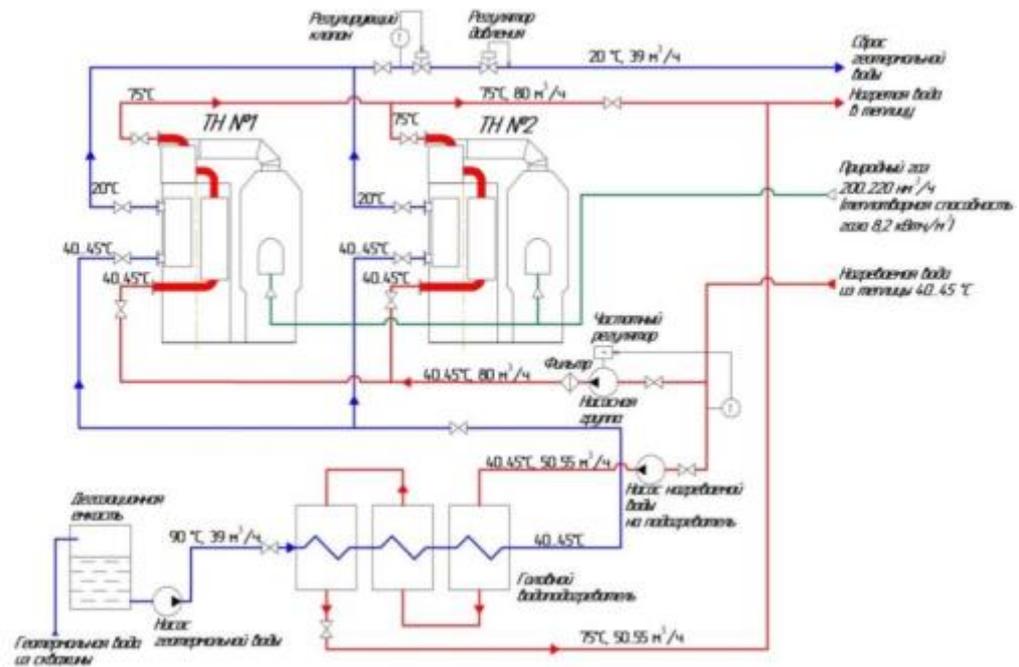


Рисунок 4.8 – Принципиальная схема теплоснабжения тепличного комплекса ООО "Радуга" [207]

В данной системе накипь образуется на пластинах теплообменника и внутри коммуникаций первичного контура, соприкасающихся с геотермальным теплоносителем. В процессе солеотложения ухудшаются теплотехнические характеристики, возрастает гидравлическое сопротивление трубопроводов, возможна их полная закупорка и выход системы из строя.

Для предупреждения отложений из карбоната кальция величина рН поддерживалась на уровне 6,5–7,5, обеспечивающем стабильность воды, за счет добавки в воду серной кислоты. Применяемые реагентные методы не позволяют предотвращать накипеобразование, а работают по факту образования накипи. Для повышения рентабельности предприятия в ЗАО «Радуга» была проведена научно-исследовательская работа по применению безреагентных методов обработки геотермальных вод.

В результате проведенной НИР принято решение об установке акусто-магнитного аппарата. Значительное снижение солеотложения было достигнуто при акусто-магнитной обработке геотермальной воды при помощи акусто-магнитного аппарата. Наибольшая эффективность обработки воды достигается при сочетании ультразвука с магнитным вращающимся полем. На данный способ были получены патенты РФ [89,90].

Установлено, что термальная вода непосредственно будет подаваться в систему теплоснабжения, и она не подвергается дополнительному нагреву в котлах или теплообменниках. Наблюдения за процессами отложения карбоната кальция в геотермальной системе на месторождениях вод различного химического состава, минерализации, за температурой и давлением на устье скважины, наличием взвешенных частиц показали, что отложение карбоната кальция для вод различных скважин происходит в строго определенном месте по трассе транспортирования воды.

Это место при прочих равных условиях характеризуется значениями давления и температуры, которые для различных вод неодинаковы. Чаще всего отложение карбоната кальция возникали за задвижками, в местах резкого падения давления и коленах труб. На рис.4.9 представлена задвижка, в которой протекала обработанная аппаратом вода.



Рисунок 4.9 – Задвижка, в которой протекала обработанная вода

Первоначально, отложения в трубе носят островной характер, затем образуется сплошное кольцо отложений, на которое наслаиваются новые слои (рис.4.10).



Рисунок 4.10 – Разрез труб, по которым протекали необработанные термальные воды

Принимая во внимание проведенные наблюдения, согласно методике эксперимента было принято решения по установке акусто-магнитного аппарата совместно с системой автоматики (Приложение В) сразу по выходу геотермальной воды из земли (рисунок 4.11).

Под действием акусто-магнитного поля кристаллы образуются не на поверхности металла, а в толще воды, и в дальнейшем переходят в шлам. Аппараты акусто-магнитной обработки воды были испытаны на геотермальных месторождениях Майкопского района Республики Адыгея. Во время технического регламента на трубах и узлах отложение солей выявлено не было, что подтверждает высокую эффективность метода.

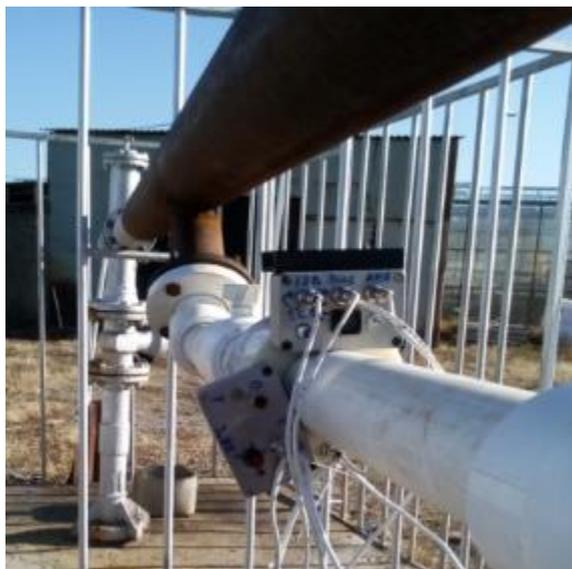


Рисунок 4.11 – Внешний вид акусто-магнитного аппарата с системой автоматики

Ультразвук поступает в систему волнообразно в обе стороны от аппарата. Эффективность акустической энергии проявляется в предотвращении формирования первичных кристаллов на трубах.

Устройство акусто-магнитной обработки воды (Приложение В), успешно применяемое в ЗАО «радуга» имеет характеристики: количество обрабатываемой воды составляет до $1,5 \text{ м}^3/\text{с}$, потребляемая мощность – около 15 Вт.

Проведенные в 2016-2018 гг. на геотермальных источниках ЗАО «радуга» экспериментальные исследования по защите металла оборудования от коррозии и его отмывки от солеотложения показали, что акусто-магнитная обработка воды позволяет не только эффективно защищать металл от коррозии, но и удалять уже имеющиеся отложения солей и продуктов коррозии в системе теплоснабжения. Акусто-магнитная технология является безреагентным методом борьбы с накипью и отложениями, обеспечивающим изменение физико-химических свойств воды для интенсификации процессов водоподготовки.

Система автоматического управления процессом акусто-магнитной обработки геотермальной воды системы отопления теплиц внедрена в гидропонных теплицах ЗАО «Радуга» (Республика Адыгея). На рисунке 4.12 (справа) представлен внешний вид шкафа с элементами и устройствами системы автоматического

управления.



Рисунок 4.12 – Шкаф с элементами и устройствами автоматического управления акусто-магнитным аппаратом

Система автоматического управления процессом акусто-магнитной обработки в системе подготовки гидропонного раствора внедрена в гидропонных теплицах ЗАО «Радуга» (Республика Адыгея). На рисунке 4.12 (слево) представлен внешний вид акусто-магнитного аппарата, установленного в системе подачи гидропонного раствора.

На экспериментальных участках урожайность выращиваемых сортов огурцов на 20 % превышала этот показатель на контрольных участках. Важный показатель плодоношения – длина междоузлий, увеличился на 25% на экспериментальных участках. Капельные установки подачи гидропонного раствора перестали засоряться солевыми отложениями, что устранило необходимость их механической очистки.

Проведенные в 2016-2018 гг. в тепличном комплексе ЗАО «Радуга» экспериментальные исследования по акусто-магнитной обработке гидропонного раствора показали, что обработка раствора позволяет получить увеличение урожайности растений на двадцать процентов. На рисунке 4.13 представлен акусто-магнитный аппарат, установленный в систему подачи гидропонного раствора.



Рисунок 4.13 – Акусто-магнитный аппарат, установленный в систему подачи гидропонного раствора

В течение всех опытов поддерживался оптимальный уровень относительной влажности – до 75 %. Плоды огурцов достигали хороших товарных и вкусовых качеств только в состоянии технической спелости при массе 380–460 г. На первоначальном этапе огурцы снимали чуть меньшего размера, для того чтобы нагрузка не оказалась слишком большой. Уборка недоросших зеленцов приводит к большим потерям урожая вследствие нарушения баланса в растении. Поэтому важно было проводить ежедневные сборы. В процессе проведения опыта велись наблюдения за температурой воздуха, температурой и влажностью субстрата и др. Проводились биологические наблюдения, а также подсчитывалось количество растений на единице площади, нарастание вегетативной массы, определялось количество цветков и плодов на главном стебле, площадь листовой поверхности.

Наблюдения показали, что обработка гидропонного раствора посредством акусто-магнитного аппарата оказывала существенное влияние на рост и развитие растений, формирование органов продуктивности огурца. Интегрированным показателем реакции гибридов огурцов на изменения гидропонного раствора в теплице являются их отличия по биометрическим показателям (табл. 4.14).

Таблица 4.14 Биометрические наблюдения за растениями огурца

Гидропон- ный рас- твор	Длина стебля перед ликвида- цией, см	Длина листо- вой пла- стинки, см	Количе- ство листьев, шт.	Пло- щадь ли- стьев, см ²	Количес- тво цветков, шт.	Количес- тво плодов, шт.	Диаме- тр стебля , см	Длина междоузл- ий, см
Обрабо- танный раствор	290	30	30	12600	40	26-30	0,98	12
Обычно- венный раствор	290	25-27	24-26	9100	15-22	22-26	0,9	9,5

Результаты наблюдений послужили научной основой для объяснения различий урожайности огурца и качестве плодов. Уборка и учет урожая – самый ответственный, заключительный этап эксперимента. От качества и точности проведения уборки и учета урожая зависит исход всей сложной и трудной работы в течение целого оборота. В связи с этим требуется большое внимание и аккуратность, так как небрежность и поспешность ведут к грубым и непоправимым ошибкам и совершенно обесценивают весь опыт.

4.5 Сравнение результатов математического и физического экспериментов

В данном параграфе представлены результаты сравнения математического и физического моделирования акустических, магнитных, электрических процессов, протекающих в акусто-магнитных аппаратах, предназначенных для обработки геотермальной воды, которая используется для отопления гидропонных теплиц.

На рисунке 4.14 представлены результаты расчета электрической цепи в среде моделирования Elcut. Из рисунка можно увидеть, что расчетное напряжение составляет 10,924 В и ток, текущий через одну обмотку, равен 0,14 А.

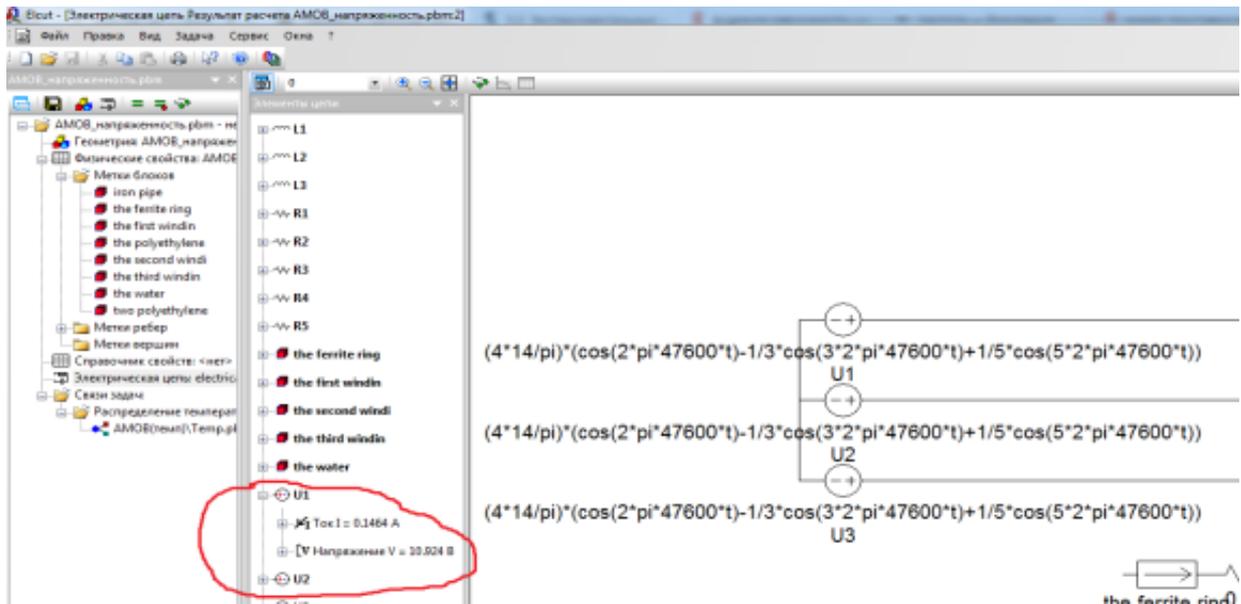


Рисунок 4.14 – Результаты расчета электрической цепи в среде моделирования Elcut

Разница в расчетных значениях тока и напряжения, снятых с акусто-магнитного аппарата, составляет для напряжения 5%, а для тока 4%, что говорит о хорошей точности построенной модели.

Из результата моделирования (рисунок 4.15) температуры в среде моделирования Elcut видно, что $T=336 \text{ K} = 62,85 \text{ }^\circ\text{C}$ (температура внутри ферритового кольца). На поверхности аппарата $35,84 \text{ }^\circ\text{C}$ по результатам моделирования.

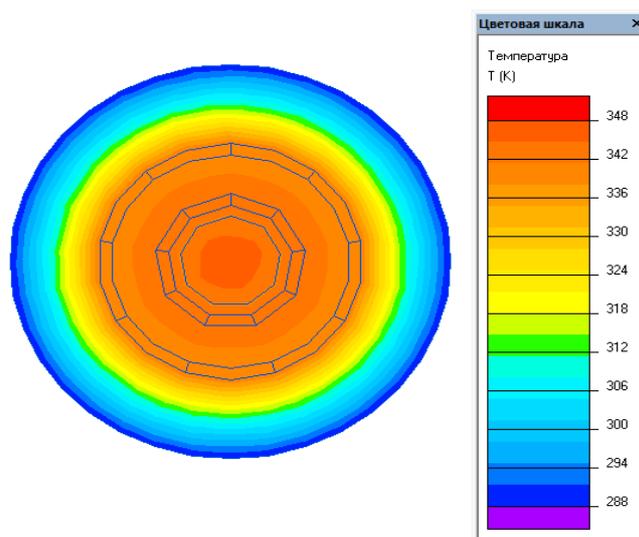


Рисунок 4.15 – Результат расчета температуры в Elcut

На рисунке 4.16 показаны результаты измерения температуры аппарата пирометром.



Рисунок 4.16 – Температура акусто-магнитного аппарата, измеренная пирометром

Из рисунка видно, что температура меньше проектируемой и составляет 18,1 °С, т.е. разница 51%. Одна из причин такой разницы объясняется тем, что при расчётах использовали значение магнитной проницаемости феррита согласно надписи на ферритовом кольце, а в реальности она может отличаться на 30 %.

Для ферритового кольца мощность, выделяемая в ферромагнитных нетоковедущих частях, находящихся в переменном магнитном поле, определяется:

$$P = P_0 \cdot m, \quad (4.183)$$

где P_0 – удельные потери в магнитопроводе; m – масса магнитопровода, кг.

Магнитная индукция в магнитопроводе зависит от напряженности магнитного поля $B = f(H)$.

$$H = \frac{w \cdot I}{l_{cp}} = \frac{2730 \cdot 0,15}{0,0299} = 13695,652. \quad (4.184)$$

Магнитная индукция в магнитопроводе определена по кривой намагничивания:

$$B = f(H) = 1,3 \text{ Тл}. \quad (4.185)$$

Удельные потери в магнитопроводе будут равны:

$$P_0 = f(B) = 0,3 \text{ мВт/мм}^3. \quad (4.186)$$

Потери в магнитопроводе равны:

$$P = P_0 \cdot m = 300 \cdot 0,02843 = 8,529. \quad (4.187)$$

Количество теплоты, выделяемой в однородном проводнике:

$$Q = P \cdot t. \quad (4.188)$$

За время в 1 минуту в ферритовом сердечнике выделится количество теплоты равное 511,74 Вт. При расчетах магнитная индукция составляла 1,4 Тл, соответственно $P = 400 \cdot 0,02843 = 11,372$ и $Q = 682,32$.

Разница в выделившейся теплоте за единицу времени составляет 25%, что подтверждает выдвинутую гипотезу. Оставшиеся 25% связаны с температурой окружающей среды.

Температура подающей трубы, на которой установлен акусто-магнитный аппарат, составляла 78,9 °С (рисунок 4.17).



Рисунок 4.17 – Температура подающей трубы, измеренная пирометром

На рисунке 4.18 представлена зависимость индукции от длины рабочей зоны акусто-магнитного аппарата по результатам моделирования и опыта. В центре рабочей зоны магнитная индукция по результатам моделирования составила от $B_{\text{мод}} = 4,5 \cdot 10^{-6}$ Тл до $B_{\text{мод}} = 5,6 \cdot 10^{-6}$ Тл, а в результате проведенных опытов среднее значение измеренной магнитной индукции составило $B_{\text{опыт}} = 5,1 \cdot 10^{-6}$ Тл. Отклонение от среднего значения по модели составляет 2%, что демонстрирует достаточную надёжность и точность проведенного моделирования.



Рисунок 4.18 – График зависимости индукции от длины рабочей зоны акусто-магнитного аппарата по результатам моделирования и опыта

При анализе полученных данных были получены следующие факты:

- максимальное значение напряженности (18,48) соответствует длине рабочей зоны аппарата 6,99 см и частоте 25106 Гц;
- максимальная сила Лоренца достигается при следующих значениях факторов: длина рабочей области аппарата 5,19 см; подаваемая частота 47540 Гц; индуктивность обмотки 45 мкГн; сопротивление обмотки 73,26 Ом (рисунок 4.19).

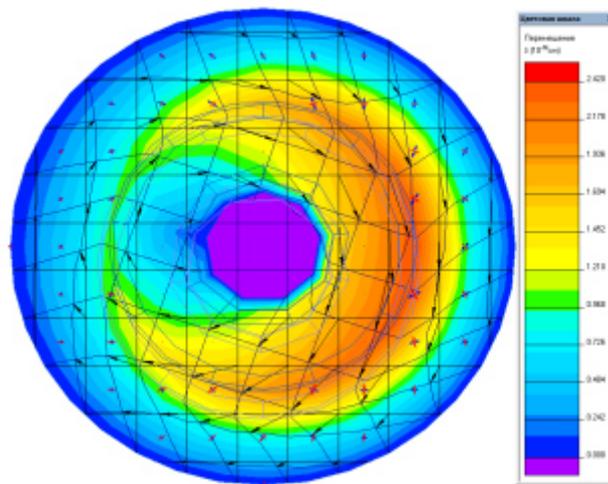


Рисунок 4.19 – Результаты моделирования внутреннего напряжения и перемещения внутри акусто-магнитного аппарата

Кристаллооптическим способом было проведено сравнение размеров кристаллов взвеси, выделяющихся при упаривании проб исходной и обработанной воды. Для анализа было отмерено в химические стаканы емкостью 200-300 мл по 150 мл профильтрованной воды до и после обработки полем, и проведено упаривание в 2 раза (метка на стекле) на электроплитке в строго идентичных условиях. До нагревания на дне каждого стакана была расположена в наклонном положении стеклянные пластинки (предметные стекла) так, чтобы в конце упаривания уровень жидкости был не ниже верхнего уровня пластинок. После упаривания пластинки извлекались пинцетом и были помещены с каплей воды на предметном стекле. Капля была накрыта покровным стеклом и частицы рассматривались в микроскоп сначала при увеличении в 50-70 раз, а затем в 200-300 раз. Далее определили размер кристаллов обработанной и необработанной воды в микрометрах, а также отметили форму кристаллов. Полученные данные позволили сделать оценку и выявить относительное влияние акусто-магнитного поля на обрабатываемую жидкость. Противонакипный эффект $K_{\text{э}}$:

$$K_{\text{э}} = \frac{H-M}{H}, \quad (4.189)$$

где $K_{\text{э}}$ – уменьшение размера кристаллов, отнесенное к размеру кристалла в исходной воде;

H – средний размер кристаллов, выделившихся в исходной воде, мкм;

M – средний размер кристаллов, выделившихся в воде обработанной акусто-магнитным полем, мкм.

Для получения значений результирующего признака использовался кристаллооптический способ, описанный выше. На предметное стекло помещались капли исследуемой воды: геотермальной необработанной и прошедшей обработку акусто-магнитным полем. Далее производилось изучение полученных результатов. Для этого использовались микроскопы с увеличением 300, 600 и 1000 раз. Далее приведены полученные изображения (Рисунки 4.20 – 4.22).

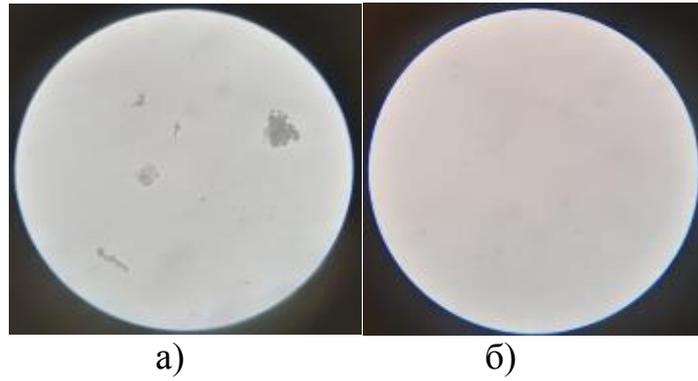


Рисунок 4.20 – Влияние акусто-магнитной обработки на центры кристаллизации (увеличение $\times 300$): а) необработанная вода; б) вода, обработанная акусто-магнитным полем

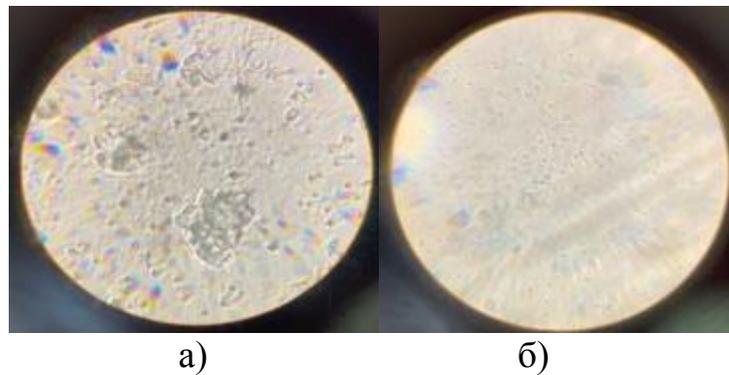


Рисунок 4.21 – Влияние акусто-магнитной обработки на центры кристаллизации (увеличение $\times 600$): а) необработанная вода; б) вода, обработанная акусто-магнитным полем

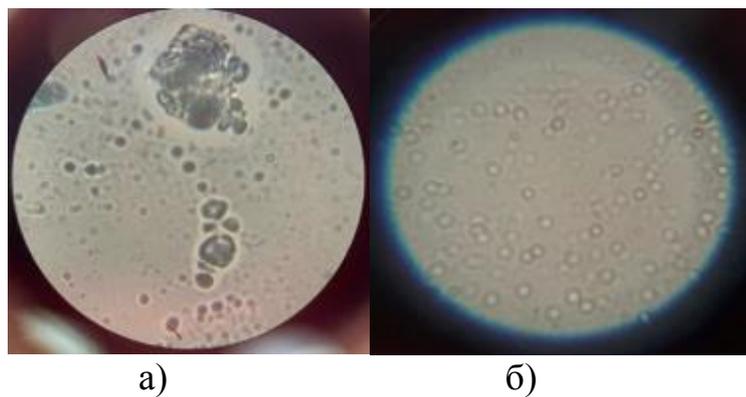


Рисунок 4.22 – Влияние акусто-магнитной обработки на центры кристаллизации (увеличение $\times 1000$): а) необработанная вода; б) вода, обработанная акусто-магнитным полем

На рисунках видно, что необработанная геотермальная вода, в отличие от обработанной, обладает явно выраженными центрами кристаллизации. Из чего следует предположение, что акусто-магнитный аппарат, воздействуя на кристаллы солей, препятствует их адсорбации, тем самым предотвращая образование твердых отложений на поверхностях теплообменного оборудования. Доказательством отсутствия образования твердых отложений на титановых пластинах теплообменника является рисунок 4.23.



а)

б)

Рисунок 4.23 – Влияние акусто-магнитной обработки на образование накипи на титановых пластинах теплообменника: а) необработанная вода; б) вода, обработанная акусто-магнитным полем

Расчетные значения средних линейных размеров кристаллов солей в обработанной и необработанной воде, были получены путем приближенного вычисления площади сложных фигур в относительных единицах. Для решения подобных задач возможно использование различных способов. Задача усложняется тем, что необходимо определить площади сложных фигур, не описываемых математическими выражениями. Поэтому было принято решение применить аналитический подход к вычислению средней площади центров кристаллизации.

В результате было определено среднее значение результирующего признака по формуле:

$$K_{\text{Эсп}} = \frac{\sum_n^i K_{\text{Эi}}}{n} = 0,88 . \quad (4.190)$$

Полученное значение результирующего признака говорит о высокой эффективности работы устройства. Близкие к этому значения были получены и в предыдущих исследованиях, где эффективность обработки определялась с помощью объемного метода и с помощью весового способа.

Сравнение мощностных характеристик акусто-магнитных аппаратов с магнитными аппаратами. В качестве аппарата выбранного для сравнения параметров, был выбран аппарат АМО-100 УХЛ4, разработанный ОАО «Энергозапчасть» (г. Чебоксары), параметры которого приведены в таблице 4.3. Выбор обоснован тем, что данный аппарат имеет близкие к акусто-магнитному аппарату производственные характеристики.

Параметры другого аппарата выбранного для сравнения были взяты из источника [111]. Согласно этой информации, противонакипный аппарат предложенный Г.В. Никитенко, «сконструированный для больших диаметров труб, состоит из четырех модулей. Основу каждого модуля составляют магнитопровод и намагничивающая катушка. Аппарат подключается к источнику постоянного тока напряжением $I = 75\text{В}$. Суммарный ток, протекающий по четырем катушкам равен $I = 4,5\text{А}$. Мощность, потребляемая АМОВ, $P = 340\text{Вт}$. Число витков намагничивающей катушки $N = 4000$. Диаметр провода $d = 0,56\text{мм}$ ».

В таблице 4.15 представлены основные показатели, по которым было проведено сравнение АМА с двумя магнитными аппаратами.

Таблица 4.15 Основные эксплуатационные показатели разных магнитных аппаратов

Показатели	Единица измерения	АМА	АМО-100 УХЛ4	Отношение	АМОВ	Отношение
Потребляемая мощность	Вт	15	500	0,03	340	0,04
Производительность	м3/час	90	100	0,90	10	9
Масса	кг	2	200	0,01	12	1,67
Общая жёсткость	мг-экв/л	0,3-7,42	6	-	5-2,5	-

На основании показателей, приведенных в таблице 4.4, можно сделать вывод о том, что разработанная конструкция акусто-магнитного аппарата при одной и той же производительности имеет более выгодные технические и мощностные характеристики. 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.

4.6 Выводы

1. Модернизирована методика планирования эксперимента с использованием обобщённых факторов и критериев подобия. Отличительной особенностью методики является наличие матрицы планирования с указанием не только значения критериев подобия, но и значения параметров, соответствующих данному численному значению. Шаг отклонения критериев подобия задаётся с помощью вариации параметров, входящих в них.
2. Изготовлен лабораторный стенд для проведения экспериментальных исследований. При проведении экспериментальных исследований применялся метод, основанный на учете количества выделившейся твёрдой фазы. Шламовый эффект определялся по количеству кислоты, затраченной на растворение осадка необработанной и обработанной воды.
3. Изготовлен макетный образец акусто-магнитного аппарата со следующими характеристиками электромеханического преобразователя: катушки намотаны медным проводом ПЭТВ-2 диаметром 0,16 мм; питание катушек производилось трёхфазным прямоугольным и треугольным напряжением частотой 18-50 кГц.
4. Разработана методика выбора параметров моделей акусто-магнитного аппарата, которая может быть рекомендована при проектировании оборудования, рассчитанного на различные значения мощности и производительности, а

- также при организации серийного производства небольших партий.
5. Проведена статистическая обработка экспериментальных данных для определения точечных оценок параметров закона распределения, где исключались грубые погрешности в результатах измерений с использованием критерия Шарлье. Получены уравнения регрессии, позволяющие определить рациональные режимы работы акусто-магнитного аппарата. Проверка гипотезы об адекватности модели показала, что относительная ошибка аппроксимации равна 2,93%.
 6. Для организации планирования эксперимента были изготовлены пять 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 рассчитали следующие оптимальные значения: $n = 749$ витков; $f = 34100$ Гц; $U = 58,9$ В.
 7. В соответствии с матрицей планирования эксперимента проведены опыты и определено критериальное уравнение регрессии для акусто-магнитной обработки термальных вод. Проведённый статистический анализ результатов эксперимента выявил однородности дисперсии опытов, дисперсии воспроизводимости эксперимента. Проверка гипотезы об адекватности модели показала, что средняя относительная ошибка аппроксимации – 0,87%.
 8. По предлагаемой методике и в соответствии с теорией подобия был изготовлен аппарат для обработки геотермальной воды на реальном объекте. 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 м³/час, давление 4 атм. Основные характеристики аппарата: установлен на трубе

диаметром 75 мм, скорость жидкости в трубе 0,41 м/с, в излучателе ферритовое кольцо М2000НМ, 125х80х12, резонансная частота колебаний 14782 Гц, число витков обмотки одной фазы 208, диаметр провода обмотки 0,67 мм, ток 1А, потребляемая мощность около 15 Вт, масса магнитопровода 0,472 кг, коэффициент противонакипного эффекта 0,89.

9. Проведенные в 2016-2018 гг. на геотермальных источниках ЗАО «Радуга» экспериментальные исследования по защите металла оборудования от коррозии и его отмывки от солеотложения показали, что акусто-магнитная обработка воды позволяет не только эффективно защищать 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 аналогичный показатель на контрольных участках, важный показатель плодоношения, длина междоузлий, увеличился на 25% на экспериментальных участках.
10. Результаты сравнения математического и физического моделирования основных физических процессов акустических, магнитных, электрических процессов, протекающих в акусто-магнитных аппаратах показали следующие результаты:
 - по электрическим характеристикам: расчетное напряжение составляло 10, В, в эксперименте – 9,5 В; величина тока при моделировании через одну обмотку 0,14 А, в эксперименте – 0,134 А. Таким образом, относительная ошибка не превышала 5%;
 - по магнитным характеристикам: в центре рабочей зоны магнитная индукция по результатам моделирования составила от $B_{\text{мод}} = 4,5 \cdot 10^{-6}$ Тл до $B_{\text{мод}} = 5,6 \cdot 10^{-6}$ Тл, а в результате опытов среднее значение измеренной магнитной индукции составило $B_{\text{опыт}} = 5,1 \cdot 10^{-6}$ Тл, отклонение от среднего 2%;
 - по акустическим характеристикам: амплитудное значение движущей силы

$1,027 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$, колебательная скорость на механическом выходе 3279,08 м/с; по отложению накипи при моделировании – коэффициент 0,86, в производственных условиях – 0,88.

11. 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 более выгодные технические и мощностные характеристики. 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.

5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТО-МАГНИТНОГО АППАРАТА В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

5.1 Расчет затрат на стадии исследования и разработки

Для модернизации электрооборудования систем теплоснабжения сельскохозяйственных объектов Республики Адыгея посредством систем безреагентной обработки жидкости необходимо открыть серийное производство с годовым объемом 1000 изделий, сохраняя такой объем производства в течение трех лет. Сначала произведём расчет затрат на стадии разработки и исследования. Предположим, что разработка акусто-магнитного аппарата ведется на специализированном предприятии, оснащенном соответствующими механизмами и оборудованием. Производство работ сторонними организациями, амортизационные отчисления на оборудование, командировочные расходы не учитываем. Затраты на разработку акусто-магнитного аппарата включают в свой состав:

- затраты на электроэнергию;
- затраты на заработную плату разработчиков;
- затраты на изделия и полуфабрикаты.

Информация о расходах на заработную плату разработчиков содержится в таблице 5.1.

Таблица 5.1 Заработная плата разработчиков акусто-магнитного аппарата

N n/n	Этапы разработки	Исполнители	Почасовая ставка руб.	Количество исполнителей	Трудоемкость, ч.	Затраты руб.
1.	Получение ТЗ и разработка ТУ на схемное решение	Ведущий инженер	199	1	50	9950
2.	Разработка схемы	Инженер	142	1	16	2272

Продолжение таблицы 5.1.

3.	Изготовление лабораторного образца	Техник	112	1	14	1568
4.	Испытания	Инженер	142	1	4	568
		Техник	112	1	3	336
5.	Оформление протоколов	Инженер	142	1	2	284
6.	Разработка ТУ на конструкцию	Ведущий инженер	199	1	20	3980
7.	Разработка конструкции	Инженер-конструктор	150	2	20	3000
8.	Опытный образец	Техник	112	2	5	560
9.	Оформление протокола испытаний	Техник	112	1	4	448
10.	Испытания нового образца	Инженер	142	1	10	1420
11.	Оформление документации	Техник	112	1	10	1120
		Инженер	142	1	4	568
ИТОГО:						26074

Данные по зарплате основаны на среднем уровне заработной платы в Республике Адыгея за 2018 год. Установим надбавку к зарплате в размере 30% от основной в размере 7822 рублей (для ускорения работ и повышения качества).

Отчисления: ПФР - 22%, ФМС - 5,1%, ФСС - 2,9%, ФСС травматизм - 1%, итого - 31%. Общий фонд зарплаты с отчислениями составит:

$$\begin{aligned}
 Z_{\text{общ}} &= Z_0 + Z_d + \frac{Z_0 + Z_d}{100} r = 26074 + 7822 + \\
 &+ \frac{26074+7822}{100} 31 = 44404 \text{ руб.}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

где r - суммарный коэффициент начислений на зарплату, равный 0,31.

Накладные расходы составят 50% от заработной платы:

$$N_p = 44404 \cdot 0,5 = 22202 \text{ руб.}
 \tag{5.2}$$

Для расчета затрат на электроэнергию, стоимость материалов, комплектующих изделий, энергоносители составим таблицы 5.2 – 5.5.

Таблица 5.2 Затраты на электроэнергию

Наименование прибора	Время работы, ч	Потребляемая мощность, кВт	Расход электроэнергии, кВт·ч	Тариф, руб./кВт·ч	Стоимость, руб.
Осциллограф	50	0,1	5	4,61	23,05
Вольтметр	34	0,07	2,4	4,61	11,06
Паяльник	100	0,04	4	4,61	18,44
Сверлильный станок	5	1	5	4,61	23,05
Обмоточный станок	48	0,25	12	4,61	55,32
Освещение	–	–	100	4,61	461
И т о г о					591,92

Таблица 5.3 Стоимость расходных материалов

Наименование материалов	Единица измерения	Норма расхода	Цена единицы, руб.	Стоимость, руб.
Припой ПОС 61 d=3.0мм катушка	кг	0,2	3400	680
Канифоль	кг	0,2	1500	300
Стеклотекстолит 2-сторонний, фольгированный FR4 50x100мм 35/35 (1.5мм, 35мкм),	шт	5	130	650
Монтажный провод МГШВ 0.14 кв.мм.	м	50	13	650
Изолента ПВХ 19мм x 20м черная	м	5	50	250
И т о г о				2530
Вспомогательные материалы (5%)				126,5
В с е г о				2656,5

Таблица 5.4 Стоимость комплектующих изделий

Наименование изделия	Цена единицы, руб.	Количество, шт.	Стоимость, руб.
Контроллер ОВЕН ПЛК100.24.P.	12862	1	12862
Микроконтроллер КР1878ВЕ1	80	1	80
Датчик тока GY-712	260	3	780
Датчик температуры DS18B20	190	3	570
Датчик скорости потока жидкости	3190	3	9570.
Шаровый электропривод	4500	3	13500
Реле 12 В	130	6	780
Реле 24 В	190	3	570
Предохранитель H520 0.5 А, 250В	5	4	20
MF-R090, 0.9 А, Предохранитель самовосстанавливающийся, MultiFuse	22	1	22
Блок питания 5В	250	1	250
Контактор постоянного тока 24В	1200	1	1200.
M2000HM, 40x25x11, Сердечник ферритовый кольцевой	180	3	540
DS1110-01-4, Разъем миниатюрный 4pin (блок-кабель)	110	10	1100
300-041-12, Клеммник винтовой, 4-контактный, 5мм, прямой	21	3	63
КР-7 "На защелках" (Черный), Корпус для РЭА 90x56x30 пласт (Черный)	140	1	140
G1020BF, Корпус для РЭА 108.5x54x30мм, пластик, черный с крепежным фланцем	130	1	130
ЕС5010Н12S, Вентилятор 12В, 50x50x10мм, подш. скольжения, 5000 об/мин	200	1	200
KG-300-1, Радиатор	6	6	36
STC0044, Термостат - контроллер кулера	200	1	200
KLS8-0214 M3-06 (HTS-306), Стойка пластмассовая для печатных плат 6мм	9	8	72
КР142ЕН8Б (00-18г), Стабилизатор 12В, 1.5А.	110	1	110

Продолжение таблицы 5.4.

<i>Псевдотрехфазный генератор:</i>			
Микросхема К155ЛП5	26	6	156
Микросхема К155ИЕ4	22	6	132
Микросхема К155ЛА3	45	6	270
Резистор 1кОм	2	8	16
Резистор 10 кОм	2	6	12
Резистор 6.2 кОм	2	6	12
Конденсатор 0,33 мкФ	2	2	4
Конденсатор 0,1 мкФ	30	2	60
Конденсатор 100 мкФ	49	2	98
ЕСАР (К50-35), 2200 мкФ, 16 В, 105°С, Конденсатор электролитический алюминиевый	18	1	18
ЕСАР (К50-35), 1000 мкФ, 16 В, 105°С, Конденсатор электролитический алюминиевый	12	1	12
Диод КД105Д	3	6	18
Диод КД212А пластик	110	1	110
Резистор 220 Ом	4	2	8
Резистор 4.7 кОм	0,90	6	5,4
Транзистор КТ817В	12	6	72
Транзистор КТ815Г	29	3	87
КР142ЕН5А, Стабилизатор напряжением 5В, 1.5А [КТ-28-2 / ТО-220] (=МС7805)	50	1	50
GNL-3012HD, Светодиод красный 60° d=3мм 1.8мКд 700нм (Red)	5	3	15
СПЗ-19б, 0.5 Вт, 1 кОм, Резистор подстроечный	140	1	140
Транзистор КТ315Б	6	6	36
<i>Усилительная схема:</i>			
Транзистор КТ315Б	6	6	36
Транзистор КТ817В	12	6	72
Резистор 6.2 кОм	2	6	12
Резистор 10 кОм	2	6	12
Транзистор МП40	11	1	11
Транзистор КТ605	22	1	22
РЭС-22 реле	140	1	140
Диод Д814Д	14	1	14
<i>Итого:</i>			44445,4

Расчеты затрат на основные энергоносители приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 Затраты на энергоносители

Наименование энергоносителей	Расход, куб.м	Тариф, руб./куб.м, руб./кв.м	Стоимость, руб.
Водоснабжение	300	17,04	5112
Канализация	200	14,04	2808
Отопление	200	32,93	6586
Горячее водоснабжение	150	171,03	25654,5
Газ	500	6,26	85515
Электроэнергия	300 кВт·ч	4,61 руб./ кВт·ч	1383
ИТОГО			127058,5

Стоимость материалов и комплектующих: $C_m = 2394$ руб. $C_k = 44445,4$ руб.

Стоимость проведения патентного поиска, стоимость оформления заявки на полезную модель и способ, затраты на составление патентного формуляра, – всё это составляет затраты сторонних организаций. Ориентировочно, затраты сторонних организаций составят 50% от затрат на заработную плату при разработке, что соответственно составит 22202 руб.

Общие затраты на проведение НИОКР составят:

$$S_{\text{НИОКР}} = 44409 + 22202 + 591,92 + 2394 + 44445,4 + 127058,5 = 241100,82 \text{ руб.} \quad (5.3)$$

5.2 Определение цены аппарата и дисконтированного дохода при организации мелкосерийного производства

Выполним расчет себестоимости акусто-магнитного аппарата точным методом. Для этого воспользуемся ранее полученными данными. Дополнительно вычислим заработную плату производственных рабочих. Результаты калькуляции основной зарплаты приведены в таблице 5.6. Результаты расчета отдельных составляющих себестоимости представлены в таблице 5.7.

Таблица 5.6 Основная заработная плата производственных рабочих

Наименование технологической операции	Разряд выполняемых работ	Норма времени, ч	Часовая тарифная ставка, руб./ч	Заработная плата по тарифу, руб.
Сборочная	3	10	29	290
Слесарная	4	10	31	310
Регулировочная	4	40	31	1240
Монтажная	4	150	31	4650
И т о г о:		210	122	6490
Доплата за качество (10%)				649
В с е г о:				7139

Таблица 5.7 Полная калькуляция себестоимости изделия

Статья калькуляции	Сумма, руб.
1 Основная заработная плата производственных рабочих	6490
2 Единый социальный налог	2570
3 Дополнительная заработная плата производственных рабочих	649
4 Стоимость сырья и материалов	2656,5
5 Стоимость покупных и комплектующих изделий	44445,4
6 Стоимость израсходованной электроэнергии	1383
Итого:	58094

Валовую прибыль определим в размере 25% от себестоимости:

$$P_{\text{в}} = 0,25 \cdot 58094 = 14523,5 \text{ руб.} \quad (5.4)$$

Оптовая цена:

$$C_{\text{опт}} = 58094 + 2655 = 60749 \text{ руб.} \quad (5.5)$$

Примем оптовую цену в размере 60750 рублей.

С учетом 18% НДС договорная цена:

$$C_{\text{дог}} = 60750 \left(1 + \frac{18}{100} \right) = 71685 \text{ руб.} \quad (5.6)$$

Чистая прибыль от реализации одного акусто-магнитного аппарата (с уче-

том налога на прибыль) составит:

$$\Pi = \Pi_{\text{в}} \left(1 - \frac{\text{НП}}{100}\right) = 14523,5 \left(1 - \frac{20}{100}\right) = 17428,2 \text{ руб.} \quad (5.7)$$

Годовая прибыль от реализации всех проданных акусто-магнитных аппаратов:

$$\Pi_{\text{г1}} = 1000 \cdot 17428,2 = 17428200 \text{ руб.} \quad (5.8)$$

Рассчитаем капитальные вложения. Предпроизводственные затраты состоят из затрат:

- на НИОКР;
- затрат на освоение производства;
- затрат на доработку опытных образцов, макетов;
- затрат на корректировку документации $K_{\text{осв}}$.

Все перечисленные затраты определяются в соответствии с рекомендациями[127]:

$$K_{\text{пп.з}} = S_{\text{НИОКР}} + K_{\text{осв}} = S_{\text{НИОКР}} + 0,005(N \cdot C_{\Pi}) = 241100,82 + 0,05(3000 \cdot 58094) = 8955200,82 \text{ руб.} \quad (5.9)$$

При оценке капиталовложений в основные фонды учтем то, что производство организовано на базе имеющегося оборудования рассматриваемого предприятия и составит 1000000 руб. ($K_{\text{оф}} = 1000000 \text{ руб.}$). Оборотные средства принимаем в размере 10% от себестоимости среднегодового выпуска продукции:

$$K_{\text{ос}} = 0,1(1000 \cdot 58094) = 5809400 \text{ руб.} \quad (5.10)$$

Прочие капиталовложения:

$$K_{\text{пр}} = 0,05(1000000 + 5809400) = 340470 \text{ руб.} \quad (5.11)$$

Капиталовложения в производственные фонды определим по формуле:

$$K_{\text{пф}} = K_{\text{оф}} + K_{\text{ос}} + K_{\text{пр}} = 1000000 + 5809400 + 340470 = 7149870 \text{ руб.} \quad (5.12)$$

Полные капиталовложения:

$$K_{\text{п}} = 8955200,82 + 7149870 = 16105070,82 \text{ руб.} \quad (5.13)$$

Для реализации проекта используются собственные средства и кредит в Сбербанке в размере 8 млн. руб. под 12,5 % годовых с равномерными выплатами по кредиту в течение 3 лет. Расчет выплат по кредиту выполним по формуле

[142]:

$$K_m = \frac{E_k(1+E_k)^{T_k}}{(1+E_k)^{T_k}-1} \cdot K_n, \quad (5.14)$$

где K_m – платеж на m – том шаге с учетом процентов; E_k – номинальная годовая процентная ставка в банке.

$$K_m = \frac{0,125(1+0,125)^3}{(1+0,125)^3-1} * 8000000 = 3358085,33 \text{ руб.} \quad (5.15)$$

Данная сумма будет выплачиваться ежегодно в течение 3 лет. Соответственно, за три года общая сумма выплат по кредиту составит:

$$K_{m\text{общ}} = 3358085,33 \cdot 3 = 10174256 \text{ руб.} \quad (5.15)$$

Выполним расчет общих экономических показателей. Учтём, что в первый год, кроме выплаты по кредиту, будут израсходованы собственные средства в размере 8105070,82 руб.

Чистый дисконтированный доход (без учета амортизации) при норме дисконта $E_p = 0,15$ составит:

$$\begin{aligned} \text{ЧДД} &= \sum_{m=0}^n \frac{\Pi_{rm}}{(1+E_p)^m} - I_0 = \sum_{m=0}^3 \frac{\Pi_{rm}}{(1+0,15)^m} - 8105070,82 \\ &= \left(\frac{-6627638,94}{(1+0,15)^0} - 8105070,82 \right) + \left(\frac{17428200 - 6627638,94}{(1+0,15)^1} \right) \\ &+ \left(\frac{17428200 - 6627638,94}{(1+0,15)^2} \right) + \left(\frac{17428200 - 6627638,94}{(1+0,15)^3} \right) \\ &= -14732709,76 + 9391792 + 8166776 + 7101544 = \\ &= 9927403 \text{ руб,} \end{aligned} \quad (5.16)$$

где I_0 – разовые (одномоментные) инвестиции.

Так как ЧДД > 0, то проект является эффективным. Необходимо определить внутреннюю норму доходности ($E_{вн}$).

Количество лет определяется продолжительностью расчетного этапа инновационного проекта, а приведенные (дисконтированные) доходы и затраты инновационного проекта определяются путем приведения к расчетному моменту с нормой дисконта E_p [142]:

$$\sum_{t=0}^{T_p} \frac{D_t}{(1+E_p)^t} = \sum_{t=0}^{T_p} \frac{K_t}{(1+E_p)^t}, \quad (5.17)$$

где T_p – число лет в расчетном периоде; D_t – результат в t -й год; K_t – капитальные вложения (инвестиции) в t -й год.

Для нахождения E_p необходимо решить уравнение при заданных значениях D_t , K_t и T_p .

Предположим, что E_p находится в интервале 60–70%.

ЧДД при норме дисконта $E = 50\%$ равен:

$$\begin{aligned} \text{ЧДД} = \sum_{m=0}^3 \frac{\Pi_{rm}}{1,5^m} - 8105070,82 = & \left(\frac{-6627638,94}{1,5^0} - 8105070,82 \right) + \\ & \left(\frac{17428200-6627638,94}{1,5^1} \right) + \left(\frac{17428200-6627638,94}{2,25} \right) + \left(\frac{17428200-6627638,94}{3,375} \right) = \\ & -14732709,9 + 7200374 + 4800249 + 3200166 = 468079,9 \text{ руб.} \end{aligned} \quad (5.18)$$

(положителен).

При $E = 60\%$ ЧДД равен:

$$\text{ЧДД} = \sum_{m=0}^3 \frac{\Pi_{rm}}{0,6^m} - 8105070,82 = -1126534 \text{ руб.} \quad (5.19)$$

(отрицателен).

$$E_p = 50 + \frac{468079,9}{468079,9 - (-1126534)} (60 - 50) = 53\%. \quad (5.20)$$

Рассчитаем срок окупаемости капиталовложений с учетом дисконтирования. Величины приведенных (дисконтированных) годовых доходов по годам расчетного периода вычислены ранее ($E_p = 0,15$) и равны следующим значениям:

$$\begin{aligned} D_1 &= 9391792 \text{ руб.} \\ D_2 &= 8166776 \text{ руб.} \\ D_3 &= 7101544 \text{ руб.} \end{aligned} \quad (5.21)$$

Величина дохода за три первые года составит:

$$\sum_i^3 D_i = 9391792 + 8166776 + 7101544 = 24660112 \text{ руб.} \quad (5.22)$$

Полученное значение больше величины собственных капиталовложений 8105070,82 руб.

Период окупаемости:

$$T_o = K_{TO} / D_{TO}, \quad (5.23)$$

где K_{TO} , D_{TO} – дисконтированные инвестиции в инновации и суммарные дисконтированные денежные доходы за период T_0 до того момента времени реализации проекта, когда NPV становится равной нулю.

Для оценки эффективности проекта срок окупаемости с учетом дисконтирования следует сопоставлять со сроком реализации проекта (длительностью расчетного периода). Формула расчета срока окупаемости имеет вид [153]:

$$C_o = \frac{1}{ИД}, \quad (5.24)$$

где ИД – индекс доходности.

Индекс доходности позволяет определить, в какой мере возрастает ценность фирмы в расчете на 1 рубль инвестиций [153]:

$$ИД = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{ДП_t}{(1+Ep)^t}}{И_0} = \left(\frac{17428200-6627638,94}{(1+0,15)^1} \right) + \left(\frac{17428200-6627638,94}{(1+0,15)^2} \right) + \frac{\left(\frac{17428200-6627638,94}{(1+0,15)^3} \right)}{8105070,82} = 3,04, \quad (5.25)$$

где $ДП_t$ – денежный поток в конце периода t ; $И_0$ – разовые (одномоментные) инвестиции.

Срок окупаемости составит:

$$C_o = \frac{1}{ИД} = \frac{1}{3,04255} = 0,3 \text{ года}. \quad (5.26)$$

Годовые затраты на ремонтные работы акусто-магнитного аппарата:

$$C_p = k_c \cdot C_{ТКС}, \quad (5.27)$$

где k_c – средний коэффициент сложности ремонтных работ для данного оборудования %; $C_{ТКС}$ – стоимость оборудования руб.

$$C_p = 0,25 \cdot 41400,4 = 10350,1 \text{ руб.} \quad (5.28)$$

Годовые затраты на электроэнергию, потребляемую акусто-магнитным аппаратом:

$$C_э^I = P_{кмс} \cdot K_{cp} \cdot C_{кВтч} \cdot k \cdot K_{рч}, \quad (5.29)$$

где $P_{кмс}$ – максимальная мощность внедряемого комплекса (1,374 кВт); $C_{кВтч}$ – стоимость 1 кВт-ч электроэнергии (4,6 руб.); k – коэффициент берется в зависимости от количества смен работы линии, в нашем случае 3 смены (2,7); $K_{рч}$ – ко-

личество рабочих часов в году (8760 руб.); k_{cp} – коэффициент, определяющий среднюю потребляемую мощность (0,76):

$$C_3^l = 1,374 \cdot 0,76 \cdot 4,6 \cdot 2,7 \cdot 8760 = 113612,5 \text{ руб.} \quad (5.30)$$

Годовые амортизационные отчисления:

$$A_{ATK} = a_{ATK}[(1 + k_{Т.М_2})(C_{КТС})], \quad (5.31)$$

Амортизационные отчисления для системы автоматизированного управления акусто-магнитным аппаратом:

$$A_{ATK} = a_{ATK}[(1 + k_{Т.М_2})(C_{КТС})] = 0,083[(1 + 0,1)29188] = 2664,8 \text{ руб.} \quad (5.32)$$

где a_{ATK} – средний коэффициент амортизационных отчислений; $k_{Т.М_2}$ – коэффициент, учитывающий расходы на транспортировку, монтаж и наладку оборудования, равен 0,1; $C_{КТС}$ – стоимость единицы оборудования равна 29188 руб.

Годовые амортизационные отчисления равны:

$$A_{ATK} = 2665 \text{ руб.} \quad (5.33)$$

Годовые затраты на эксплуатацию комплекса технических средств системы автоматического управления акусто-магнитным аппаратом:

$$C_{ATK}^r = Z_{ATK} + A_{ATK} + C_p + C_3^l, \quad (5.34)$$

где Z_{ATK} – годовая заработная плата рабочих, обслуживающих систему автоматического управления акусто-магнитным аппаратом; A_{ATK} – годовые амортизационные отчисления (2665 руб.); C_p – годовые затраты на ремонтные работы комплекса технических средств (10350,1 руб.); C_3^l – годовые затраты на электроэнергию, потребляемую комплексом технических средств (8739,7 руб).

Среднегодовая заработная плата оператора составляет 96000 руб.

$$Z_{ATK} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot Z_{cp} \cdot N_{РАБ}, \quad (5.35)$$

$$Z_{ОПЕР} = 1,4 \cdot 1,2 \cdot 1,365 \cdot 96000 \cdot 2 = 220147,2 \text{ руб.} \quad (5.36)$$

$$Z_{ATK.ОБЩ} = 220147,2 \text{ руб.} \quad (5.37)$$

$$C_{ATK}^r = 220147,2 + 2665 + 10350,1 + 8739,7 = 241902 \text{ руб.} \quad (5.38)$$

Капитальные затраты на разработку и ввод в действие системы автоматиче-

ского управления акусто-магнитным аппаратом:

$$K_{KTC} = C_p + (1 + k_{TM_2})(C_{KTC}) + C_{CMO}, \quad (5.39)$$

где C_p - стоимость всех работ по разработке проекта и внедрению системы автоматического управления акусто-магнитным аппаратом 50000 руб; C_{CMO} - стоимость разработки специального программного обеспечения для управления процессом акусто-магнитной обработки геотермальной воды составит 30000 руб; C_{KTC} - стоимость единицы оборудования (29188 руб).

$$K_{KTC} = 50000 + (1 + 0,1)(29188) + 30000 = 112106,8 \text{ руб.} \quad (5.40)$$

Технико-экономические показатели эффективности от внедрения новой системы автоматического управления акусто-магнитным аппаратом рассчитаем следующим образом. Полностью автоматическая система управления безреагентной обработки жидкости обеспечивает: снижение частоты обслуживания; повышение надежности системы управления. Специфика работы гидропонных теплиц предусматривает непрерывный цикл подачи теплоносителя в теплицы, поэтому централизация всех контрольных функций позволяет уменьшить время решения проблем, возникающих в результате эксплуатации, и более эффективно использовать геотермальные ресурсы при возникновении проблем при работе установки.

Годовая экономия от внедрения системы автоматического управления акусто-магнитным аппаратом:

$$\text{ЭГ} = \text{З}_{\text{осв}} - C_{\text{АТК}}, \quad (5.41)$$

$$\text{ЭГ} = 480581,3 - 241902 = 238679,3 \text{ руб.} \quad (5.42)$$

Годовой экономический эффект от внедрения системы автоматизации управления акусто-магнитным аппаратом:

$$\text{Э} = \text{Э}_z - E'_n K_{KTC}, \quad (5.43)$$

где E'_n - нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений $E'_n = 0,33$.

$$\text{Э} = 238679,3 - 0,33 \cdot 112106,8 = 234977,8 \text{ руб.} \quad (5.44)$$

Срок окупаемости капитальных вложений:

$$T_{ок} = \frac{K_{КТС}}{\mathcal{E}_Г}, \quad (5.45)$$

$$T_{ок} = \frac{112106,8}{238679,3} = 0,47. \quad (5.46)$$

Экономия в заработной плате высвобождаемых работников:

$$Z_{осв} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot Z_{ср.р.} \cdot N_{осв.р.}, \quad (5.47)$$

где k_1, k_4 – коэффициенты премиальной надбавки соответственно для рабочих и инженерно-технических работников (1,4); k_2 – коэффициент, учитывающий дополнительную зарплату (1,2); k_3 – коэффициент отчислений на социальное страхование (1,356); $Z_{ср.р.}$ – средняя годовая заработная плата высвобождаемых рабочих (75240 руб. оператора и 59088 руб. техника); $N_{осв.р.}$ – число высвобождаемых рабочих.

$$Z_{осв.опер} = 1,4 \cdot 1,2 \cdot 1,365 \cdot 75240 \cdot 2 = 345080,7 \text{ руб.}; \quad (5.48)$$

$$Z_{осв.машин} = 1,4 \cdot 1,2 \cdot 1,365 \cdot 59088 \cdot 1 = 135500 \text{ руб.}; \quad (5.49)$$

$$Z_{осв.общ} = 480581,3 \text{ руб.} \quad (5.50)$$

Результаты технико-экономического расчета в целом могут быть представлены в виде таблицы 5.8.

Таблица 5.8 Результаты технико-экономического расчета

№ п/п	Показатели	Значения
1.	Количество производимых АМА в год, шт.	1000
2.	Общие капиталовложения, руб. - собственные средства, руб. - сумма кредита, руб.	16105071 8105071 8000000
3.	Внутренняя норма доходности, %	53
4.	Чистый дисконтированный доход при производстве и реализации, руб.	9927403
5.	Срок окупаемости, лет	0,5
6.	Цена АМА, руб.	71685
7.	Затраты на НИОКР, руб.	241101
8.	Годовая прибыль при производстве 1000 шт., руб.	17428200

Анализ прайс-листов показывает, что цена аппаратов по безреагентной обработке жидкости находится в интервале от 17600-319000 руб., что выше проектного варианта.

5.3. Экономические показатели при внедрении акусто-магнитного аппарата в сельскохозяйственное производство с учетом факторов неопределенности и риска

Проект можно рассматривать, как устойчивый в целом, если он имеет достаточно высокие и положительные значения ЧДД. В этих расчетах желательно увеличивать норму дисконта на величину премии за риск. Необходимо отметить, что если разность ВНД – Е превышает 10-15 % и индекс доходности затрат больше 1,2, то инвестиционный проект может считаться устойчивым. Об устойчивости проекта говорит и малый срок окупаемости, если только по истечении этого срока ЧДД проекта положителен [153].

Проведём расчет нормы дисконта как средневзвешенную стоимость капитала. Учтём только заемные и собственные средства без их дальнейшего подразделения, далее представлена формула для расчета нормы дисконта:

$$E = R_c G_c + R_z G_z = 8105071 \cdot 0,5032 + 8000000 \cdot 0,497 = 4078471,72 + 3976000 = 8054471,7, \quad (5.51)$$

где R_c – цена собственного капитала; R_z – цена заемного капитала; G_c – доля собственного капитала (в общем капитале фирмы); G_z – доля заемного капитала. Проект устойчив, так как $\text{ВНД} > 25-30\%$ при $E \text{ не } > 15\%$, а ИД превышает 1,2.

Ожидаемый интегральный эффект:

$$\mathcal{E}_{\text{ож}} = \lambda \cdot \mathcal{E}_{\text{max}} + (1 - \lambda) \cdot \mathcal{E}_{\text{min}} = 0,3 \cdot 9927403 + 0,7 \cdot 123179 = 3064446, \quad (5.52)$$

где \mathcal{E}_{max} – наибольший интегральный эффект; \mathcal{E}_{min} – наименьший интегральный эффект (ЧДД) по рассмотренным сценариям; λ – для учета неопределенности эффекта специальный норматив ($0 \leq \lambda \leq 1$). При $\lambda = 0$ эффективность

проекта оценивается пессимистически. При $\lambda = 1$ эффективность проекта оценивается оптимистически. Рекомендуется $\lambda = 0,3$).

Стоимостные и натуральные показатели используются для оценки эффективности возделывания сельскохозяйственных культур. Они показывают соотношение между конечными результатами и произведенными затратами. Практически применяются четыре показателя: прибыль на балло-гектар (тыс. руб.), трудоемкость продукции (чел·ч/ц), полная себестоимость и рентабельность [208].

Сопоставляя результаты, выполняют экономическую оценку новых технологий возделывания сельскохозяйственных культур, соответственно затраты базовой и новой технологий. Исходные данные: расчетно-аналитические, экспериментальные значения.

Экономический эффект от внедрения (\mathcal{E}), если урожайность при новой технологии не увеличивается, однако уменьшаются удельные затраты, вычисляется по формуле:

$$\mathcal{E} = F (Z_{\text{бт}} - Z_{\text{нт}}), \quad (5.53)$$

где F – площадь посева при использовании новой технологии; $Z_{\text{бт}}$ и $Z_{\text{нт}}$ – затраты трудовых и материальных ресурсов на единицу площади соответственно по базовой и новой технологии [208].

Экономическую эффективность определим в зависимости от объема продукции (валовым сборам) по новой технологии и затратам в расчете на один центнер в базовой и новой технологии, если возделывание культуры по новой технологии приводит к увеличению ее урожайности:

$$\mathcal{E} = Q_{\text{н}} (Z_{\text{тр}} - Z_{\text{мт}}), \quad (5.54)$$

где $Q_{\text{н}}$ – объем производства продукции по новой технологии; $Z_{\text{тр}}$ – затраты трудовых ресурсов на один центнер продукции, полученной соответственно при использовании базовой технологии; $Z_{\text{мт}}$ – затраты материальных ресурсов на один центнер продукции, полученной соответственно при использовании новой технологии [208].

Чистый дисконтированный доход от внедрения изобретения для практических расчетов, вычисляется по следующей формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (P_t - I_t) \frac{1}{(1+E)^t} - K, \quad (5.55)$$

где I_t – эксплуатационные издержки на шаге t расчета при условии, что в них не входят капиталовложения; P_t – текущий эффект на шаге t расчета; K – сумма дисконтированных капиталовложений.

Сумма дисконтированных капиталовложений находится по формуле:

$$K = \sum_{t=0}^T K_t \frac{1}{(1+E)^t}, \quad (5.56)$$

где K_t – капиталовложения на шаге t расчета.

В капиталовложения входят затраты на транспортировку и установку, которые определяются по формуле:

$$K = k_{\text{ТМ}} \text{Ц}_\text{Д} = 0,1 \cdot 58094 = 5809 \text{ руб.} \quad (5.57)$$

где $k_{\text{ТМ}} = 0,1$ – коэффициент затрат на транспортировку и монтаж.

При расчете эксплуатационных издержек необходимо учитывать особенности организации процесса обслуживания акусто-магнитных аппаратов в сельскохозяйственном производстве.

Действующая регламентная система предусматривает поддержание работоспособности системы безреагентной обработки воды путём проведения запланированных профилактических испытаний, включающих снятие системы автоматики, диагностику, замену по необходимости радиоэлементов блоков и узлов. Акусто-магнитный аппарат не требует профилактических работ до окончания срока эксплуатации.

При диагностическом обслуживании системы автоматики акусто-магнитного аппарата эксплуатационные издержки составят:

$$I = I_{\text{ЗП}} + I_{\text{Э}} + I_{\text{А}} + I_{\text{ТО}}, \quad (5.58)$$

где $I_{\text{ЗП}}$ – зарплата обслуживающего персонала с начислениями; $I_{\text{Э}}$ – затраты на потребляемые энергоресурсы; $I_{\text{А}}$ – амортизационные отчисления; $I_{\text{ТО}}$ – затраты на ТО и ТР.

Заработная плата обслуживающего персонала определяется по формуле:

$$I_{\text{ЗП}} = \text{Ч}_0 t_0 S_3 k_3 \left(1 + \frac{r}{100}\right), \quad (5.59)$$

где $Ч_0$ – численность обслуживающего персонала; t_0 – время, затраченное на годовое обслуживание системы автоматики, мес; S_3 – среднемесячная заработная плата обслуживающего персонала, руб./мес; k_3 – коэффициент дополнительной заработной платы (1,1–1,2); r – процент отчислений на социальное страхование.

Рабочий процесс диагностики системы автоматики акусто-магнитного аппарата предполагает одного оператора с заработной платой по третьему разряду при трудозатратах не более трёх чел.час за период регламентных работ. Соответственно принимаем $Ч_0 = 1$; $S_3 = 242$ руб./мес.

Суммарные затраты времени на обслуживание и ремонт системы автоматики акусто-магнитного аппарата составят $t_0 = 0,5$ мес. Заработная плата:

$$И_{зп} = 1 \cdot 0,5 \cdot 242 \cdot 1,1 \left(1 + \frac{26,6}{100}\right) = 169 \text{ руб}, \quad (5.60)$$

Затраты на энергоресурсы учитывают мощность и время работы электроинструмента, а также действующие тарифы на электроэнергию. Затраты на электроэнергию определяются по формуле:

$$И_э = P_э t_э n_э Ц_э = 0,2 \cdot 40 \cdot 1 \cdot 4,6 = 271 \text{ руб}, \quad (5.61)$$

где $P_э$ – мощность потребляемая электроинструментом; $t_э$ – время работы электроинструментом; $n_э$ – количество ремонтных работ в год; $Ц_э$ – тариф на электроэнергию.

Амортизационные отчисления

$$И_A = Ц_B \frac{H_A}{100}, \quad (5.62)$$

где $H_A = 22\%$ – норма амортизационных отчислений на приборы; $Ц_B$ – балансовая стоимость устройства:

$$Ц_B = Ц_д + К = 58094 + 5809 = 63903 \text{ руб}. \quad (5.63)$$

Подставим значение $Ц_B$ в формулу (5.62), получим:

$$И_A = 63903 \cdot \frac{22}{100} = 14059 \text{ руб}. \quad (5.64)$$

Работы по техническому обслуживанию электронных устройств производятся сторонними организациями при норме отчислений $H_{тр} = 5\%$. Тогда за-

траты:

$$И_{ТО} = Ц_{Б} \frac{H_{ТР}}{100} = 63903 \cdot 0,05 = 3195 \text{ руб.} \quad (5.65)$$

Суммируя все найденные составляющие, по формуле (5.58) получим годовые эксплуатационные издержки:

$$И = 169 + 271 + 14059 + 3195 = 5094 \text{ руб.} \quad (5.66)$$

Дополнительный экономический эффект от внедрения интенсивной ($\mathcal{E}_Д$) технологии в расчете на две делянки (выделенных для исследования) рассчитывается по формуле[209]:

$$\mathcal{E}_Д = (Ц_{и} - C_{и})Y_{и} - (Ц_{о} - C_{о})Y_{о} \quad (5.67)$$

где $Ц_{и}, Ц_{о}$ – цена реализации с учетом качества продукции в сравниваемых вариантах при интенсивной и обычной технологиях соответственно, руб; $C_{и}, C_{о}$ – себестоимость урожая собранного с опытных делянок в сравниваемых вариантах при интенсивной и обычной технологиях, руб.; $Y_{и}, Y_{о}$ – урожайность культур в сравниваемых вариантах при интенсивной и обычной технологии кг/дел.

$$Ц_{и} = 336 \cdot 52 = 17472 \text{ руб,} \quad (5.68)$$

$$Ц_{о} = 280 \cdot 45 = 15120 \text{ руб.} \quad (5.69)$$

Подставляя полученные значения в формулу (5.67) получим:

$$\mathcal{E}_Д = (17472 - 12096) \cdot 336 - (15120 - 10080) \cdot 280 = 1806336 - 1411200 = 395136 \text{ руб.} \quad (5.70)$$

При определении величины сравнительной экономической эффективности в качестве величины экономического эффекта (результат) принимается экономия от снижения текущих затрат, а в качестве затрат – дополнительные капитальные вложения, обусловившие эту экономию:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{C_1 - C_2}{K_2 - K_1} = \frac{(8922000 - 6087000)}{(860000 - 335000)} = 5,4, \quad (5.71)$$

где $\mathcal{E}_{ср}$ – расчётная сравнительная экономическая эффективность; C_1 и C_2 – текущие затраты первого и второго сравниваемых вариантов, руб; K_2 и K_1 – дополнительные капиталовложения по сравниваемым вариантам, руб.

Резерв снижения материальных затрат на производство запланированного

выпуска продукции за счет внедрения новых технологий и других организационно-технических мероприятий можно определить следующим образом:

1) За счет внедрения акусто-магнитного аппарата втрое снизилась концентрация ингибитора СНПХ-1004 при сохранении прежней эффективности.

2) За счет уменьшения в три раза времени проведения регламентных работ по промывке теплообменника. До установки акусто-магнитного аппарата межрегламентный срок составлял две недели, после установки аппарата межрегламентный срок увеличился до двух месяцев. При проведении самих работ по очистке теплообменника нет необходимости отмачивать пластины теплообменника в кислоте, а достаточно под давлением промывать их водой.

3) За счёт уменьшения затрат на очистку теплотехнического оборудования от накипеобразований (заслонки, трёхходовые краны, нагнетающий насос).

5.4 Выводы

1. 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 9,9 млн. руб., срок окупаемости капиталовложений 0,5 года. Экономия эксплуатационных затрат при внедрении новой безреагентной технологии обработки теплоносителя в геотермальном тепличном комплексе площадью 5 га составила 525000 руб.
2. 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 выполненного исследования

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 линейное 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 $\xi_{\text{вп}} = f(\pi_i, j)$. 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 отработки аналогов в виде критериальных комплексов параметров. Обоснованы основные параметры с соответствующими расчетными формулами для определения их значений магнито-стрикционного 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 электротехнологических 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 – $1,91 \text{ м}^3/\text{ч}$, 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° – 15 с; максимальная температура жидкости +100°С. 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 си-

стемы 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 индук-

ции 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 м³/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 по 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеев, М.В. Электродные системы для обработки семян / М.В. Авдеев, Е.М. Басаргина, Г.П. Лещенко, М.Р. Хаматдинова. // Механизация и электрификация сельского хозяйства, –2005. – №7. – С. 16-17.
2. Агранат, Б.А. Основы физики и техники ультразвука / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский. – Учеб. Пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.: ил.
3. Агранат, Б.А. Ультразвуковая технология / Б.А. Агранат, В.И. Башкиров, Ю.И. Китайгородский, Н.Н. Хавский. – М.: «Металлургия», 1974. 504 с.: ил.
4. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1971.
5. Акопян, Б.В. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами: Ультразвук в медицине, ветеринарии и экспериментальной биологии / Б.В. Акопян, Ю.А. Ершов. / Под ред. С.И. Щукина. – Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 224 с.: ил.
6. Александров, Б.Л. Экспериментальное и теоретическое обоснование воздействия электромагнитного поля на воду / Б.Л. Александров, А.Б. Александров, Б.Е. Красавцев, В.Б. Симкин, А.С. Цатурян. // Научные труды VI Международного конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине». – СПб: ISBN 5-86456-007-3, 2012. – С.1. – www.biophys.ru/archive/congress2012/proc-p1.pdf 1983.
7. Алхасов, А.Б. Возобновляемые источники энергии [Электронный ресурс]. – учебное пособие. / А.Б. Алхасов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016.
8. Алхасов, А.Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии / А.Б. Алхасов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 376 с. – ISBN 978-5-9221-0976-5.
9. Аксенов, С. И. Физико-химический механизм чувствительности биологических процессов к слабым ЭМП низких частот / С.И. Аксенов. Под общей ред. А.Б. Рубина. – Проблемы регуляции в биологических системах изд. – М. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006. – 480 с.

10. Амерханов, Р.А. Теплотехника: Учебник для вузов / Р.А. Амерханов, Б.Х. Драганов. – М.: «Машиностроение», 2006. – 432 с.
11. Андреев, А.Г. Применение акустических противонакипных устройств в малой энергетике / А.Г. Андреев, П.А. Панфиль. // Портал по теплоснабжению, Рос-Тепло.ру. – URL: www.rosteplo.ru (дата обращения: 14.07.2019).
12. Антонов, О.Е. Разрушение микроскопических организмов путем их облучения СВЧ электромагнитными сигналами специальной формы / О.Е. Антонов, Е.В. Козырева, Т.Я. Свинцева, Н.В. Гончарова. // Известия АН СССР. Серия Биологическая. – М. 1997. № 6. – С. 728 -734.
13. Антонов, С.Н. Аппараты магнитной обработки воды. Проектирование и исследование: монография / С.Н. Антонов, А.И. Адошев, И.К. Шарипов, В.Н.Шимякин. – Ставрополь: АГРСУ Ставропольского гос. Аграрного университета, 2014. – 220с.
14. Асатурян, В.И. Теория планирования эксперимента. / В.И. Асатурян. – М.: Радио и связь, 1983.
15. А.с. № 1212971 СССР, МКИ С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости. / Н.И. Богатырев, Н.И. Катрич, А.В. Лопатченко. (СССР). – № 3776742/23-26; Заявл. 31.07.84; Оpubл.23.02.86; Бюл. № 7. – 4 с.: ил.
16. А.с. № 1692948 СССР, МКИ С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости. / Н.И. Богатырев, И.А. Потапенко, В.С. Змитрович и др. (СССР). – № 4414209/26; Заявл. 25.04.88; Оpubл.23.11.91; Бюл. № 43.
17. А.с. № 1748687 СССР, МКИ А 01 С 1/00. Устройство для предпосевной обработки семян. / И.А. Потапенко, Г.И. Третьяков, Н.И. Богатырев. (СССР). – № 4421260/15; Заявл. 31.03.88; Оpubл.23.07.92; Бюл. № 27.
18. Балбашова, Н.Б. Миниатюрные импульсные трансформаторы на ферритовых сердечниках. / Н.Б. Балбашова. – М.: «Энергия», 1976. 120 с., ил.
19. Бамдас, А.М. Дроссели переменного тока радиоэлектронной аппаратуры (катушки со сталью) / А.М. Бамдас, Ю.А. Савиновский. – М.: Изд-во «Советское радио», 1969. 248 с.
20. Бард, И. Нелинейное оценивание параметров. / И. Бард. – М.: Финансы и ста-

- тистика, 1979.
21. Басарыгина, Е.М. Способы и средства электронно-ионной технологии для гидропонного растениеводства: дис. д-р., тех., наук: 05.20.02 / Басарыгина Елена Михайловна; Челябинский государственный агроинженерный университет. – Челябинск, 2005. – 48 с.
 22. Басарыгина, Е.М. Сравнение вариантов обработки прорастающих семян / Е.М. Басарыгина, В.А. Захаров, Г.П. Лещенко. // Вестник ЧГАУ. Челябинск. – 2005. – № т 44. – С. 23-25.
 23. Бедриковская, Н.П. Гидропоника комнатных растений. / Н.П. Бедриковская. – Киев: «Наука думка», 1972.
 24. Барнс, Ф.С. Влияние электромагнитных полей на скорость химической реакции / Ф.С. Барнс. – Биофизика, 1996. – Т.41. Вып. 4. – С.790-797.
 25. Беликов, С.Е. Водоподготовка: Справочник / С.Е. Беликов, под ред. д.т.н., действительного члена Академии промышленной экологии С.Е. Беликова. – М.: Аква-Терм, 2007. – 240 с. С. 135.
 26. Бентли, М. Промышленная гидропоника / М. Бентли. – Перевод с английского Т.Л. Чебановой. – М.: «Колос», 1965.
 27. Бергман, Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – М.: «Иностранная литература», 1957.
 28. Бинги, В. Н. Индукция метастабильных состояний воды / В. Н. Бинги.– М. Препринт МНТЦ ВЕНТ. – №.3.– 1991.
 29. Бинги, В. Н. «Токовые» состояния протона в воде / В. Н. Бинги. // Журнал физической химии. – 1991.— Т. 65.– № 7. – С. 2002-2008.
 30. Бинги, В. Н. Биоманнитные корреляции и гипотеза токовых состояний протона в воде / В. Н. Бинги. – М.: Биофизика. – 1992. – Т. 37.– № 3.– С. 596-600.
 31. Бинги, В.Н. Магнитобиология: эксперименты и модели. / В. Н. Бинги. – М.: «МИЛТА», 2002.
 32. Бородин, И.Ф. Развитие электротехнологии в сельскохозяйственном производстве / И.Ф. Бородин. // Механизация и электрофикация производства. – 1983.– №6. – С. 27-31.

33. Бутузов, В.А. Геотермальное теплоснабжение / В.А. Бутузов. // Энергосбережение и водоподготовка. – 2002. – № 4. – С.9-12.
34. Бутузов, В.А. Повышение эффективности систем теплоснабжения на основе возобновляемых источников энергии: Дис. ... д-ра техн., наук: 05.14.08. / Бутузов В.А. ; Кубанский гос. технол. университет. – Краснодар.– 2004. – 48 с.
35. Булычева, З.Н. Отечественные материалы для магнитострикционных преобразователей / З.Н. Булычева, Л.И. Ганева, И.П. Голямина. // Вопросы судостроения. – Сер. Акустика. – 1974. – №1. – С.34-39.
36. Вандышев, В.Н. Влияние предварительного омагничивания воды на энтальпийные характеристики растворения полярных неэлектролитов / В.Н. Вандышев, С.А. Кокшаров, Д.В. Батов, В.П. Королев. // Тез. докл. 13 Всес. конф. по химической термодинамике и калориметрии. – Красноярск: СТИ, 1991. – С. 254.
37. Вахитов, Я.Ш. Теоретические основы электроакустики и электрическая аппаратура / Я.Ш. Вахитов. – М.: Искусство, 1982.
38. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) / В.А. Веников. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Учеб. пособие для вузов, «Высшая школа», 1976.
39. Викторов, И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике / И.А. Викторов. – М.: «Наука», 1966.
40. Воробьёв, Г.С. Теория электромагнитного поля и основы техники СВЧ: учебное пособие / Г.С. Воробьёв, С.В. Соколов, Л.Д. Писаренко, Л.Д. Журба. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2010. – 420 с.
41. Говорков, В. А. Электрические и магнитные поля / В. А. Говорков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: «Энергия», 1968.
42. Голямина, И. П. Магнитострикционные излучатели из ферритов / И. П. Голямина. – В кн.: Физика и техника мощного ультразвука, книга I, Источники мощного ультразвука под ред. Л. Д. Розенберга. – М: «Наука», 1967.
43. Горский, В.Г. Планирование кинетических экспериментов / В.Г. Горский. – М.: «Наука», 1984.

44. Громогласов, А.А. Водоподготовка: процессы и аппараты: Учебное пособие для ВУЗов / А.А. Громогласов, А.С. Копылов, А.П. Пильщиков. – Под ред. О.И. Мартыновой. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 271 с.
45. Гэлстон, А. Жизнь зеленого растения / А. Гэлстон, П. Девис, Р. Сэттер. – М.: «Мир», 1983.
46. Давидзон, М.И. Электромагнитная обработка водных систем в текстильной промышленности / М.И. Давидзон. – М.: Легпромбытиздат, 1988.
47. Девятков, Н.Д. Взаимодействие миллиметрового излучения с биологически активными соединениями и полярными жидкостями / Н.Д. Девятков. // Радиотехника и электроника. – М.– 1978. –№ 9. – С.1882-1890.
48. Девятков, Н.Д. Обнаружение эффекта нормализации функционального состояния внутренних органов человека под воздействием активированной миллиметровым излучением воды / Н.Д. Девятков, В.Я. Кислов, В.В. Кислов и др. // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1996. – №8. – С.5-68.
49. Демиденко, Е.З. Оптимизация и регрессия / Е.З. Демиденко. – М.: Наука, 1989.
50. Джалгасов, К. Магнитная обработка воды / К. Джалгасов.– Алма-Ата: ЦИНТИ КазССР, 1961. – С.83.
51. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Финансы и статистика, т. 1,1986; т. 2, 1987.
52. Дульнев, Г.Н. Теория тепло и массообмена / Г.Н. Дульнев. – Спб.: НИУ ИТМО, 2012.
53. Душкин, С.С. Магнитная водоподготовка на химических предприятиях / С.С. Душкин, В.Н. Евстратов. – М.: Химия, 1986.
54. Дэннис, Дж.мл. Численные методы безусловной оптимизации и решение нелинейных уравнений / Дж.мл. Дэннис, Р.М. Шнабель. – М.: Мир, 1988.
55. Ермаков, С.М. Математическая теория оптимального эксперимента / С.М. Ермаков, А.А. Жиглявский. Учеб. Пособие. – М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.
56. Живописцев, Е.Н. Электротехнология в сельскохозяйственном производстве / Е.Н. Живописцев. – М.: ВНИИТЭИСХ, 1978.
57. Загинайлов, В.И. Обобщенная оценка энергоэффективности централизованно-

- го электроснабжения и производства продукции / Т.А. Мамедов, В.И. Загинайлов. // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2019. – № 3. – С. 33-36.
58. Загинайлов, В.И. Технические средства для осциллирующего подключения грунтовых теплообменников в системах отопления с тепловыми насосами / В.И. Загинайлов С.А. Андреев. // Международный технико-экономический журнал. – 2018. – № 6.– С. 143-145.
59. Зуев, К.И. Основы теории подобия: конспект лекций / Зуев, К.И. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2011.
60. Зыков, А.К. Паровые и водогрейные котлы: Справочное пособие / А.К. Зыков. – М.: Энергия, 1991.
61. Ивахненко, А.Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Юрачковский. – М.: Радио и связь, 1987.
62. Инюшин, Н.В. Магнитная обработка промышленных жидкостей / Н.В. Инюшин, Л.Е. Каштанова, А.Б. Лаптев и др. – Уфа: ГИИТЛ "Реактив", 2000.
63. Казанцев, В.Ф. Расчет ультразвуковых преобразователей для технологических установок / В.Ф. Казанцев. – М.: Машиностроение, 1980.
64. Кардашев, Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии / Г.А. Кардашев. – М.: Химия, 1990.
65. Карташов, Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов. – М.: Высшая школа, 1985.
66. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1973.
67. Катин, А. Я. Длительность влияния воды, заряженной миллиметровым воздействием, на организм человека / А. Я. Катин. // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1996. – № 8. – С. 63-64.
68. Кикучи, Е. Ультразвуковые преобразователи / Е. Кикучи. – Перевод с английского И.П. Голяминой. – М.: Мир, 1972.
69. Киргинцев, А.Н. О физико-химических изменениях в воде и растворах под действием магнитного поля / А.Н. Киргинцев, В.М. Соколов. // Журн. физической химии. – 1966. – № 40, выпуск 9, С. 2053.

70. Кисловский, Л. Д. О возможном молекулярном механизме влияния солнечной активности на процессы в биосфере / Л. Д. Кисловский. // Влияние солнечной активности на атмосферу и биосферу Земли. – М.: Наука, 1971. – С. 147-164.
71. Китлаев, Г.Б. Тез. Докл., 3 Всероссийский съезд Общества физиологов растений / Г.Б. Китлаев, Ю.И. Долгих, Р.Г. Бутенко. – Спб.: Общество физиологов растений. – 1993. – С. 126.
72. Ковалева, Н.Е. Теория и практика применения комплексонов для обработки воды / Н.Е.Ковалева, Г.Я. Рудакова // Новости теплоснабжения. – 2002.– № 8. – С. 43-45.
73. Кондратьева, Н.П. Разработка системы автоматического управления электрооборудованием для реализации энергосберегающих электротехнологий / Н.П. Кондратьева, И.Р. Владыкин, И.А. Баранова, С.И. Юран, А.И. Батурин, Р.Г. Большин, М.Г. Краснолуцкая. // Вестник НГИЭИ. 2018. № 6 (85). – С. 36-49.
74. Копылов, В.М. Водоподготовка в энергетике / В.М. Копылов, В.Ф. Лавыгин, В.Ф. Очков. – М.: Издательство МЭИ, 2003.
75. Копылов, А.С. Процессы и аппараты передовых технологий водоподготовки и их программированные расчёты / А.С. Копылов, В.Ф. Очков, Ю.В. Чудова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. Электронный ресурс.
76. 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. – №99(05). IDA [article ID]: 0991405054. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/get.asp?id=3851&t=1>.
77. Коржаков, А.В. Методика системного анализа прикладных процессов акусто-магнитной обработки жидкости / А.В. Коржаков, В.И. Лойко, С.А. Коржакова. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2005.– №09(01). IDA [article ID]:

0090501011. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2005/01/pdf/09.pdf>.
78. Коржаков, А.В. Исследование эффективности акусто-магнитной обработки водных систем / А.В. Коржаков, В.И. Лойко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2005. – №05(03). IDA [article ID]: 0050403007. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2004/03/pdf/07.pdf>.
79. 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.
80. Коржаков, А.В. Идентификация и синтез системы акусто-магнитной обработки жидкости / А.В. Коржаков. // Ежеквартальный реферируемый научный журнал «Вестник АГУ», 2007 г. – №4 (28). – С. 78-86.
81. 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». – 2014.- №1(133). – С. 131-136.
82. 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>.
83. 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.

84. 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>.
85. Коржаков, А.В. Предупреждение коррозии и солеотложения в системах геотермального теплоснабжения / А.В. Коржаков, С.В. Оськин. // «Сельский механизатор». – 2018. - №7 – С. 38-39.
86. 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.
87. Коржаков, В.Е. 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.
88. Коржаков, А.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.
89. 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.
90. 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.
91. Коржаков, А.В. Устройство для безреагентной обработки воды / А.В. Коржа-

- ков, 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.
92. 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.
93. Коржаков, А.В. Устройство для акустической и магнитной обработки топлива в двигателе внутреннего сгорания / А.В. Коржаков, В.Е. Коржаков, С.В. Оськин // Патент РФ №2646989, С1 F02M 27/04. Заявка 2017100297, 09.01.2017. Оpubл. 13.03.2018. Бюл. №8.
94. Котенёв, С.В. Расчет и оптимизация тороидального трансформатора / С.В. Котенёв, А.Н. Евсеев. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011.
95. Кокшаров, С.А. Проверка целесообразности магнитной активации пропитки хлопчатобумажных тканей отделочными композициями / С.А. Кокшаров, В.В. Иванов // Сб. "Совершенствование технологии и оборудования хлопчатобумажн. произв-ва...". – М.: ЦНИИТЭИлегпром, 1990. – С. 131-136.
96. Кокшаров, С.А. Влияние кристаллизационной влаги неорганических солей на диффузию и фиксацию красителей/ С.А. Кокшаров, Г.В. Чистякова, Н.Н. Гусева // Изв. вузов. Химия и хим. Технология. – 1995, т. 38, № 4-5. – С.100-104.
97. Классен, В. И. Омагничивание водных систем / Классен В. И. – М.: Химия, 1982.
98. Классен, В.И. Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных смесей / Классен, В.И. – М.: Наука, 1971.
99. Ксенз, Н.В. Пути снижения энергоемкости процесса сушки семян зерновых культур / Н.В. Ксенз. // Технол. Комплексы, машины и оборудование для механизации и электрофикации сельского хозяйства. – Зерноград: 1994. – С. 185-190.
100. Кузнецов, А.Н. Механизмы действия магнитных полей на биологические системы / А.Н. Кузнецов, В.К. Ванаг. // Известия АН СССР, серия биологическая. –1987.– №6.– С. 814-827.
101. Лапотышкина, Н.П. Магнитная обработка воды, перспективы применения ее

- на тепловых электростанциях., сб. «Водоподготовка, водный режим и хим- контроль на паросиловых установках», вып. 2 / Н.П. Лапотышкина. – М.: из- во «Энергия», 1966, С. 117-124.
102. Лившиц, В.А. О невозможности возбуждения плазмopodobных магнитоди- намических волн в физиологическом водном растворе / В.А. Лившиц, А.И. Рубинштейн, А.Н. Кузнецов. // Биофизика. – 1983. – Т.28. № 3. – С. 524.
103. Лобышев, В.И. Особенности люминесценции воды, обусловленные поли- морфизмом ее структур / В.И. Лобышев, Б.Д. Рыжиков, Р.Э. Шихлинская. // Вестник МГУ, серия Физика. Астрономия. –1995. – Т. 36, № 2. – С. 48 – 54.
104. Лоусон, Ч. Численное решение задач метода наименьших квадратов / Ч. Ло- усон, Р.Хенсон. – Пер. с англ. – М.: Наука. Гл. ред. физ.- мат. Лит., 1986.
105. Лукманов, В.С. Теоретические основы электротехники. Часть 3 / В.С. Лукма- нов. – Уфа: УГАТУ, 2005.
106. Маргулис, М.А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция / М.А. Маргулис. – М.: Химия, 1986.
107. Мартынихин, Г.А. Расчёт тороидальных трансформаторов // «Радио». – 1972. –№3. – С.42.
108. Майер, В.В. Простые опыты с ультразвуком / В.В. Майер. // Библиотечка фи- зико-математической школы. – М.: Высшая школа. – 1978.– 160 стр. с илл.
109. Моисеев, Б.В. Теплоснабжение промышленных предприятий. Учебное посо- бие по дисциплине «Источники и системы теплоснабжения промпредприя- тий» для студентов специальности ПТ / Б.В. Моисеев. – М.:Энергия, 2003. – С. 34.
110. Миненко, В.И. Магнитная обработка воды при химводоочистке / В.И. Ми- ненко. – Харьков: Кн. изд-во. – 1962.
111. Никитенко, Г.В. Аппараты магнитной обработки воды для котельных низ- кого давления агропромышленного комплекса: дис. ... д-р., тех., наук: 05.20.02 / Никитенко Г.В; Кубанский государственный аграрный универси- тет. – Краснодар, 2004. – 48 с.
112. Никольский, В.В. Теория электромагнитного поля / В.В. Никольский. – М.:

Высшая школа, 1961.

113. Носач, В.В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров / В.В. Носач. – М.: МИКАП, 1994.
114. Октябрьская, Т.А. Выращивание овощей в защищённом грунте / Т.А. Октябрьская. – М.: Дом МСП, 2005.
115. Очков, В.Ф. Вода в научном, культурологическом и религиозном аспектах / В.Ф. Очков. // Водоочистка, Водоподготовка, Водоснабжение. – 2009. – №7 (19). С. 64-70. Электронный ресурс.
116. Очков, В.Ф. Программированный расчёт предочистки воды на электростанциях / В.Ф. Очков, Ю.А. Морыганова, К.А. Орлов, В.П. Коваленко. // Новое в российской электроэнергетике. – 2017. – №5. – С. 28-41. Электронный ресурс.
117. Пантелеев, А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учеб. пособие / А.В. Пантелеев, Т.А. Летоваю – 2-е изд., исправл. – М.: Высшая школа, 2005. – 544 с.: ил.
118. Пат. RU № 2125220, МКП F 28 G 7/00. Устройство для предупреждения солевых отложений в теплообменной аппаратуре. [Текст] / И.А. Потапенко, Н.И. Богатырев, В.К. Андрейчук и др. (РФ) – № 97101841/06; Заявл. 06.02.97; Опубл. 20.01.99; Бюл. № 2. – 4 с.
119. Пат. RU № 2131572, МКП F 28 G 7/00. Установка для предотвращения образования накипи. [Текст] / Н.Н. Курзин, И.А. Потапенко, Н.И. Богатырев и др. (РФ) – № 98104265/12; Заявл. 05.03.98; Опубл. 10.06.99; Бюл. № 16.
120. Пат. RU № 2136605, МКП С 02 F 1/48. Устройство для магнитной обработки жидкости / Н.И. Богатырев, Н.Н. Курзин, О.В. Вронский и др. (РФ) – № 98103200/25; Заявл. 10.02.98; Опубл. 10.09.99; Бюл. № 25. – 6 с.
121. Пат. RU № 2136606, МКП С 02 F 1/48. Электромагнитное устройство для обработки жидкости. [Текст] / Н.И. Богатырев, Н.Н. Курзин, И.В. Жраков и др. (РФ) – № 98103207/25; Заявл. 10.02.98; Опубл. 10.09.99; Бюл. № 25. – 5 с.
122. Пат. RU № 2137334, МКП А 01 С 1/00. Устройство для предпосевной обработки семян. [Текст] / Н.И. Богатырев, Н.Н. Курзин, И.А. Потапенко и др.

- (РФ) – № 98103201/13; Заявл. 10.02.98; Оpubл. 20.09.99; Бюл. № 26. – 6 с.
123. Пат. RU № 2206192, МКП А 01 С 1/00. Устройство для предпосевной обработки семян. [Текст] / Н.И. Богатырев, И.С. Белюченко, Р.Д. Тлиш и др. (РФ); заявитель и патентообладатель Куб. гос. аграр. ун-т. - № 2001129275/13, Заявл. 30.10.01; Оpubл. 20.06.03; Бюл. № 17. – 6 с.: ил.
124. Пат. RU № 2206516, МКП С 02 F 1/48 // С 02 F 103:02. Электромагнитное устройство для обработки жидкости. [Текст] / Н.И. Богатырев, И.С. Белюченко, Р.Д. Тлиш и др. (РФ); заявитель и патентообладатель Куб. гос. аграр. ун-т. - № 2001126705/12; Заявл. 02.10.01; Оpubл. 20.06.03.; Бюл. №17. – 6 с.: ил.
125. Пат. RU № 2206853, МКП F 28 G 7/00. Устройство для борьбы с отложениями в теплообменной аппаратуре. [Текст] / Н.И. Богатырев, Р.Д. Тлиш, И.А. Потапенко. (РФ); заявитель и патентообладатель Куб. гос. аграр. ун-т. - № 2001128116/06; Заявл. 17.10.01; Оpubл. 20.06.03; Бюл. № 17. – 4 с.: ил.
126. Пат. RU 2223921, МКП С 02 F 1/48, С 02 F 103:02. Способ подготовки воды. [Текст] / Н.И. Богатырев, Р.Д. Тлиш, И.А. Потапенко (РФ); заявитель и патентообладатель Куб. гос. аграр. ун-т. – № 2002102404/15; Заявл. 25.01.02; Оpubл. 20.02.04; Бюл. № 5.– 4 с.: ил.
127. Пат. RU 2292004, МПК F28 G13/00. Устройство для предупреждения солевых отложений в теплообменной аппаратуре / И.А. Потапенко, Н.И. Богатырев, А.Г. Демьянченко, Е.А. Ададунов, Д.Ю. Семернин, А.П. Коншин; заявитель и патентообладатель Куб. гос. аграр. ун-т. – № 2005131145/06; Заявл. 07.10.2005; Оpubл. 20.01.2007; Бюл. № 2. – 6 с.: ил.
128. Пат. RU 2301199, МПК С 02 F 1/48 Способ обработки воды [Текст] / Н.И. Богатырев, В.А. Белашов, А.С. Зотов и др. (РФ); заявитель и патентообладатель Куб. гос. аграр. ун-т. – № 2005136931/15(041230); Заявл. 28.11.05; Оpubл. 20.06.07; Бюл. № 17. – 3 с.: ил.
129. Педдер, В.В. «Обратный» ультразвуковой капиллярный эффект и некоторые направления его клинического применения / В.В. Педдер, А.В. Педдер, В.В. Хмелев и др. // X-я международная конференция-семинар EDM 2009, 1-6

- июля, Эрлагол. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного технического ун-та, 2009. – С 414-423.
130. Пелюгина, В.В. Электромагнитная стимуляция в растениеводстве / В.В. Пелюгина, А.В. Регуш. – М.: ВНИИТЭИСХ, 1978.
131. Перекотий, Г.П. Стимулирующие действие электрического тока на корнеобразование посадочного материала винограда / Г.П. Перекотий, А.Г. Кудряков, А.В. Винников. // Электрофикация сельскохозяйственного производства. – Краснодар: тр. Кубанского ГАУ. Вып. 346(374), 1995. – С. 153-158.
132. Пирогов, Г.В. Применение ультразвука для ограничения накипеобразования в теплосетях / Г.В. Пирогов, А.В. Богловский. // Новости теплоснабжения. – 2010. – №02 (114).
133. Потапов, С.А. О применении цинкового комплекса ОЭДФ в системах теплоснабжения и горячего водоснабжения / С.А. Потапов, Б.Н. Дрикер, Н.В. Цирульников. // ФГУП "ИРЕА". – М.: Энергосбережение и водоподготовка, 2004. №3. – С. 57-60.
134. Прищеп, Л.Г. Эффективная электрификация защищенного грунта / Л.Г. Прищеп. – М.: Колос, 1980.
135. Прохоренко, П.П. Ультразвуковой капиллярный эффект / П.П. Прохоренко, Н.В. Дежкунов, Г.Е. Коновалов. – Минск: Наука и техника, 1981.
136. Радченко, С.А. Теплотехника и энергетические машины: учебное пособие / С.А. Радченко, А.Н. Сергеев. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2015.
137. Ремпель, С.И. ГОСИНТИ, Передовой научно-технический и передовой опыт / Ремпель, С.И. – 1963. – №25-63-884/15. – №3.
138. Романовский, Ю.М. Математическая биофизика / Ю.М. Романовский, Н.В. Степанова, Д.С. Чернавский. – М.: Наука, 1984.
139. Рубан, Е.Л. О воздействии ультразвуковых колебаний на ранние фазы развития растений / Е.Л. Рубан, Н.Н. Долгополов. – М.: ДАН СССР, 1984.
140. Сазыкин, А.Г. Характеристика воздействий электричества на растительные объекты / А.Г. Сазыкин, А.Г. Кудряков. // Механизация и электрофикация сельского хозяйства. – 2015. – №2. С. 18-21.

141. Сергеев, А.Г. Метрология, стандартизация, сертификация. Учебное пособие / А.Г. Сергеев, М.В. Латышев, В.В. Терегеря. – М.: Логос, 2003.
142. Сергеев, В. А. Основы инновационного проектирования: учебное пособие / В.А. Сергеев, Е.В. Кипчарская, Д.К. Подымало; под редакцией д-ра техн. наук В.А. Сергеева. – Ульяновск: УлГТУ, 2010.
143. Смирнов, Н.А. Справочник бригадира-овощевода защищенного грунта / Н.А. Смирнов. – М.: Россельхозиздат, 1980.
144. Спириин, Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Конспект лекций / Н.А. Спириин, В.В. Лавров; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004.
145. Сравнение ионообменной смолы и удобрения // Электронный журнал о гидропонике Hydroponics Journal: сетевой журнал. – 2/2011. URL: http://gidroponika.com/component/option,com_yfiles/Itemid,470/task,view.download/cid,91/ (дата обращения: 9.03.2015). – Текст: электронный.
146. Стародубцев, Ю.Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности / Стародубцев, Ю.Н. – М.: ИП РадиоСофт, 2005.
147. Стерман, Л.С. Физические и химические методы обработки воды на ТЭС: Учебник для вузов / Л.С. Стерман, В.Н. Покровский. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
148. Татур, Т.А. Основы теории электромагнитного поля: справочное пособие для электротехн. спец. Вузов / Т.А. Татур. – М.: Высшая школа, 1989.
149. Тебенихин, Е.Ф. Безреагентные методы обработки воды в энергоустановках / Е.Ф. Тебенихин. – М., Энергоиздат, 1985.
150. Тебенихин, Е.Ф. Безреагентные методы обработки воды в энергоустановках / Е.Ф. Тебенихин. – М.: Энергия, 1977.
151. Терновцен, В.Е. Магнитные установки в системах оборотного водоснабжения / В.Е. Терновцен.– Киев: Будівельник, 1976.
152. Тихонов, А.И. Основы теории подобия и моделирования (электрические машины): Учеб. Пособие / А.И. Тихонов. – Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2011.

153. Ткаченко, А.Н. Оценка эффективности инвестиционных проектов: Учебное пособие / А.Н. Ткаченко. – Новокузнецк: НФИ КемГУ, 2003.
154. Тунеев, Н.М. Экономико - математические методы и планирование в организации сельскохозяйственного производства / Н.М. Тунеев, В.Ф. Сухоруков. – М.: Колос, 1977. – 224с.
155. Хартман, К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман. – М.: Мир, 1977.
156. Хмелев, В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010.
157. Цыганок, А.В. Ультразвуковое распыление жидкостей / А.В. Цыганок, А.В. Шалунов. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010.
158. Цугленок, Н.В. Способ обработки семян и устройство для его осуществления / Н.В. Цугленок, С.И. Шахматов, Г.И. Цугленок // Патент РФ № 2051552 А 01, С 1/10 с приоритетом от 20.03.92. Оpubл. 10. 1.96. Бюл. № 1. Зарегистрит. 22.04.93.
159. Чинаев, П.И. Расчет исполнительных, корректирующих и преобразовательных элементов автоматизированных систем / П.И. Чинаев, Н.М. Чумаков, А.П. Жданов, В.И. Панов и др.; под ред. Н.М. Чумакова. – М.: Техника, 1971.
160. Чумаевский, Н.Б. Магнитная активация при обработке воды в теплоэнергетике / Н.Б. Чумаевский, К.Н. Чумаевский, А.В. Антонович // “Энергетика и электрификация”. – 2003. – №1 (234).
161. Чхаидзе, Н.З. Методы подобия и математического моделирования в исследовании сложных систем / Н.З.Чхаидзе. – Тбилиси: Изд-во ГТУ, 2009.
162. Шерьязов, С.К. Исследование степени неоднородности магнитного поля в магнитных сепараторах сельскохозяйственного назначения / Шерьязов С.К., Никишин Ю.А., Митюнин А.А. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2020. № 7 (189). С. 121-128.
163. Шерьязов, С.К. Методика оценки энергетических характеристик возобновляемых источников / С.К. Шерьязов, О.С. Пташкина-Гирина, А.Т. Ахметшин,

- О.А. Гусева. // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2018. № 1 (45). С. 114-124.
164. Шольц, Н.Н. Ферриты для радиочастот / Н.Н. Шольц, К.А. Пискарев. – М.: Энергия, 1966.
165. Allen, D.M. The prediction sum of squares as a criterion for selecting predictor variables / D.M. Allen. – University of Kentucky, Department of Statistics, Technical Report. – 1971. – pp: 23.
166. Ayrapetyan, S.N. Magnetic fields alter electrical properties of solutions and their physiological effects / S.N. Ayrapetyan, K.V. Grigorian, A.S. Avanesyan, K.V. Stamboltsian // Bioelectromagnetics. – 1994. – Vol. 15. – pp. 133-142.
167. Aoyagi, K. Journ. Inst. Electr. Eng. Japan / K. Aoyagi, G.Endo. – May 1934. – pp. 398.
168. Allard, H. Acceleration de la germination de graines par ultrasonoration / H. Allard, I. Ots // Communication presentee au II, Congres Intern, de Biochemie a Paris, Juillet. – 1952.
169. Binhi, V.N. Biomagnetic correlations and the hypothesis of current states faprotinwater / V.N. Binhi. // Biofizika. – 1992. – Vol. 37, no. 3. – pp. 596-600.
170. Briiner, H. Rindfleisch H. Uber die biologische Wirkung von Ultraschall / H. Briiner, H. Rindfleisch // Naturwiss.– 1947. – № 34.– pp. 347.
171. Camp, L. The Magnetostrictive Radial Vibrator, Journ. Acoust / L. Camp. – Soc. Amer. – 1948. – № 225. – pp. 289.
172. Chiabrera, A. Electric and magnetic field effects on ligand binding to the cell membrane / A. Chiabrera, B. Bianco, F. Caratozzolo et al. // Interaction Between Electromagnetic Fields and Cells / Ed. by A. Chiabrera, C. Nicolini, H. Schwan. – New York: Plenum. – 1985. – pp. 253-280.
173. Fesenko, E. E. Preliminary microwave irradiation of water solutions changes their channel-modifying activity / E.E. Fesenko, V.I. Geletyuk, V.N. Kazachenko, N.K. hemeris // FEBS Lett. – 1995. – Vol. 366. – pp. 49-52.
174. Furbach, E. Beeinflussung des Flammpunktes von Mineralolen durch Ultraschallwellen / E. Furbach. // Akust. – 1940. – Zs. № 212.

175. Fukushima, K. Denki-hyoron / K. Fukushima. – Oct. 1940. – pp. 704.
176. Goldsworthy, A. Biological effects of physically conditioned water / A. Goldsworthy, H. Whitney, E. Morris // Water Res. – 1999. – Vol. 33, no. 7. – pp. 1618-1626.
177. Hercik, F. Die biologische Wirkung des Ultraschalls / F. Hercik, M. Hrdlicka, J. Sprindrich.– Sborn. Lek (tschech.), 44, 15 (1942).
178. Hersh, A.H. Attempt to Induce Mutation in *Drosophila melongaster* by Means of Supersonic Vibration / A.H. Hersh, E. Karrer.– Amer. Naturalist, 64, 552 (1930).
179. Hall, H.H., I.R.E., 1328 (Sept. 1933).
180. Korzhakov, A.V. The results of experimental research of influence of acoustic and magnetic field on electroconductivity and ph value of hydroponic solution for capicum annum / 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/ publishing office Vela Verlag Waldkraiburg. – Munich. Germany, 2017. – pp. 68-74.
181. 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. Vol.I.April 6-7, 2016. Munich, Germany, 2016.
182. 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, June 27th–28th, 2017/ publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich – Germany, 2017. – pp. 132.
183. Korzhakov, Alexey. 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. // Materials of the 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development 23 -25.05.2018. Jelgava, LATVIA
184. Korzhakov, Alexey. 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 / Alexey Korzhakov, Valery Korzhakov, Svetlana Korzhakova. // Materials of the International Conference on Industrial Engineering.–2018. <http://icie-rus.org/icie2018-rus.html>.
185. Korzhakov, Alexey. 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. // Materials of the 18th International Scientific Conference Engineering for Rural Development 22-24.05.2019 Jelgava, LATVIA.
 186. Korzhakov, Alexey. Method of power optimization in geothermal heating system by solving interrelated problems of acoustic and magnetic device model / Alexey Korzhakov, Valery Korzhakov, Svetlana Korzhakova. // Materials of the 18th International Scientific Conference Engineering for Rural Development 22-24.05.2019 Jelgava, LATVIA.
 187. 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, June 7th – 8th, 2017 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich – Germany, 2017 – 244 p.
 188. Lednev, V.V. Possible mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological systems / V.V. Lednev. // Bioelectromagnetics. – 1991. – Vol. 12. – pp. 71-75.
 189. Liboff, A. R. Geomagnetic cyclotron resonance in living cells / A. R. Liboff. // J. Biol.Phys. –1985. – Vol. 13, no. 4. – pp. 99-102.
 190. Liboff, A.R. Experimental evidence for ion cyclotron resonance mediation of membrane transport / A.R. Liboff, S.D. Smith, B.R. McLeod // Mechanistic Approaches to Interactions of Electric and Electromagnetic Fields with Living Systems / Ed. by M. Blank, E. Findl.–New York: Plenum. – 1987. – pp. 109-132.
 191. Polk, C. Physical mechanisms by which low-frequency magnetic fields can affect

- the distribution of counterions on cylindrical biological cell surfaces / C. Polk. // *J. Biol. Phys.* – 1986.– Vol. 14, no. 1. – pp. 3-8.
192. Selman, G.G. The Effect of Ultrasonics, on Mitosis / G.G. Selman/ – Expt. – 1952. *Cell. Res.*, 3, pp. 656.
193. Singh, S.P. Athermal physiological effects of microwaves on a cyanobacterium *Nostocmuscorum*: evidence for EM-memory bits in water / S. P. Singh, S. Rai, A. K. Rai et al. // *Biomed. Biol. Eng. Comput.* – 1994. – Vol. 32. – pp. 175-180.
194. Shibayama, K. Prepared Issue of Papers for Meeting of the Acoust. Society of Japan / K. Shibayama, Y. Kikuchi, T. Sato. – 1965.
195. Kikuchi, Y. Prepared Issue of Papers for Meeting of Acoustical Society of Japan / Y. Kikuchi, K. Shibayama, T. Sato. – May 1957.
196. Yamaha, G. Ober den Einfluß der Ultraschallwellen auf die Wurzelspitzenzellen von *Vicia Faba L.* Ein Orientierungsversuch, *Cytologica.* – Tokyo. – 1939. pp.524.
197. Yagi, N. Negative Oscillotropism of *Drosophila larva* to Supersonic Vibrations / N. Yagi. // *Proc. Imp. Acad.* – 1937. Tokyo, 13. – pp. 16.
198. Wallace, R.H. The Induction of Cytogenetic Variations by Ultrasonic Waves / R.H.Wallace, R. J. Bushnell, E.H. Newcomer.– *Science.* – 1948. 107. – pp. 577.
199. Wiercinski, F. J. The Effects of Supersonic Vibrations on Reconstruction and Head Frequency in *Euplanaria dorotocephala* / F. J. Wiercinski. // *Physiol. Zool.* – 1939. – pp. 62.
200. Профессиональное тепличное оборудование: сайт. – Москва. 2017 – URL: <http://www.fito-system.ru/poliv-mixer> (дата обращения: 12.03.2017г). – Текст: электронный.
201. Сайт. – URL: <http://www.hydroponics.com.au/issue-21-magnetic-water-treatment-trials> (дата обращения: 10.05.2018г). – Текст: электронный.
202. Корпорация «ИМПОТЭК»: сайт. – Москва. 2007– URL: <http://impotek.ru>(дата обращения: 30.08.2019г). – Текст: электронный.
203. Сайт. – URL: <https://m.business.ngs.ru/article/77912> (дата обращения: 30.08.2019г). – Текст: электронный.
204. Сайт. – URL: <https://vse-pro-stroyku.sqicolombia.net/dlja-teploobmennik> (дата

- обращения: 30.08.2019г). – Текст: электронный.
205. Кафедра Технологии воды и топлива НИУ МЭИ: сайт. – Москва. 2012 – URL: http://twf.mpei.ac.ru/books/vve/CH4.3_pg1.htm (дата обращения: 30.08.2019г). – Текст: электронный.
206. Сайт. – URL: <https://opalennia.com/povitryana-sistema-opalennya-ta-konditsionuvannya-teplits-z-vikoristannyam-geotermalnogo-dzherela-zhurnal-s>. (дата обращения: 30.08.2019г). – Текст: электронный.
207. Портал по тригенерации, когенерации и мини-ТЭЦ: сайт. – Москва. 2020 – URL: <http://www.combienergy.ru/stat/1006-Promyshlennyy-opyt-i-perspektivy-ispolzovaniya-otchestvennyh> (дата обращения: 30.08.2019г). – Текст: электронный.
208. Экономическая оценка сельскохозяйственных культур и эффективности технологий их возделывания: сайт. – 2020 – URL: https://studopedia.ru/13_74318_ekonomicheskaya-otsenka-selskohozyaystvennih-kultur-i-effektivnosti-tehnologiy-ih-vozdelyvaniya.html (дата обращения: 30.08.2019г). – Текст: электронный.
209. Платформа для публикаций Pandia.ru: сайт. – 2020 URL: <https://pandia.ru/text/80/188/27074.php>. (дата обращения: 12.09.2019г). – Текст: электронный.
210. НП "РосТепло": сайт. – Москва. 2020 – URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2666(дата обращения: 2.09.2019г). – Текст: электронный.
211. Гидрофлоу – водоподготовка от накипи без химии: официальный сайт. – – 2020 – URL: <http://www.h-flow.ru> (дата обращения: 30.08.2019г). – Текст: электронный.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

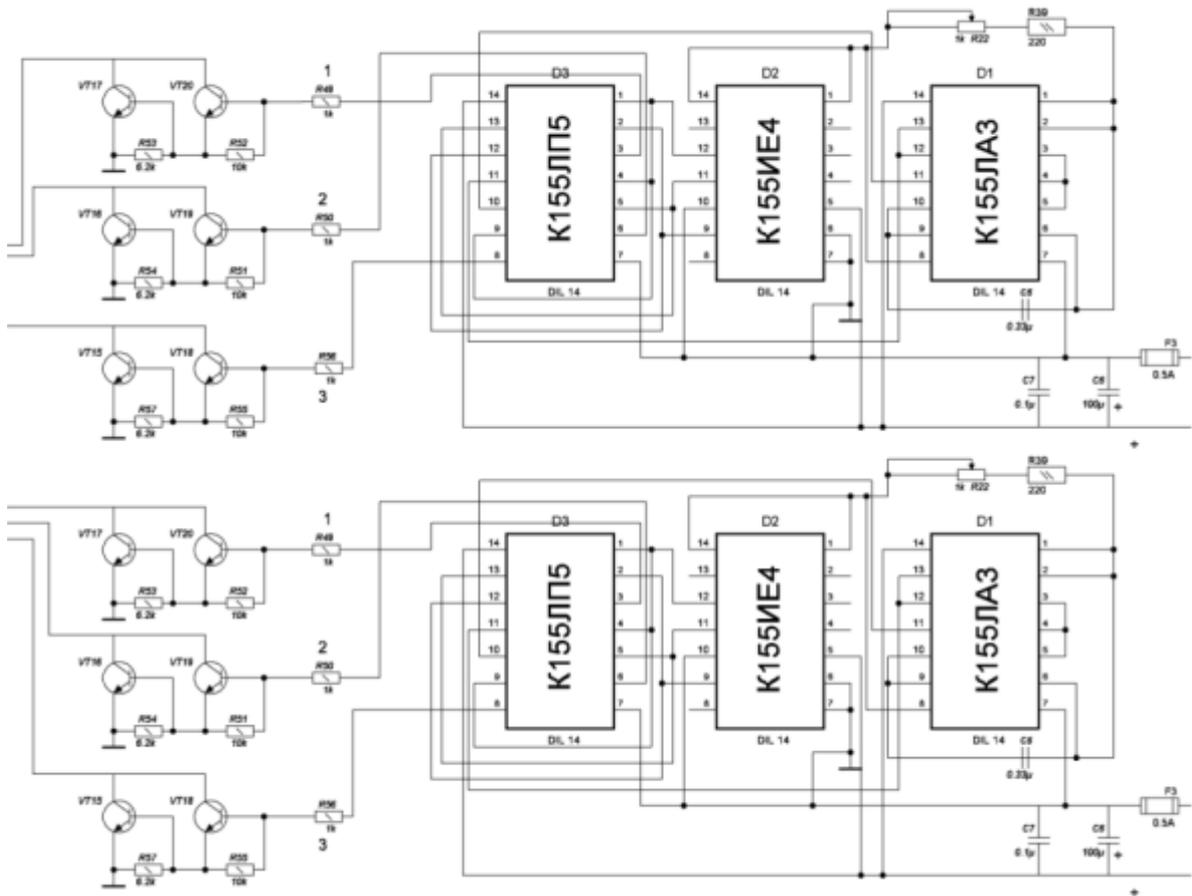


Рисунок А.1 – Принципиальная схема псевдотрехфазных генераторов

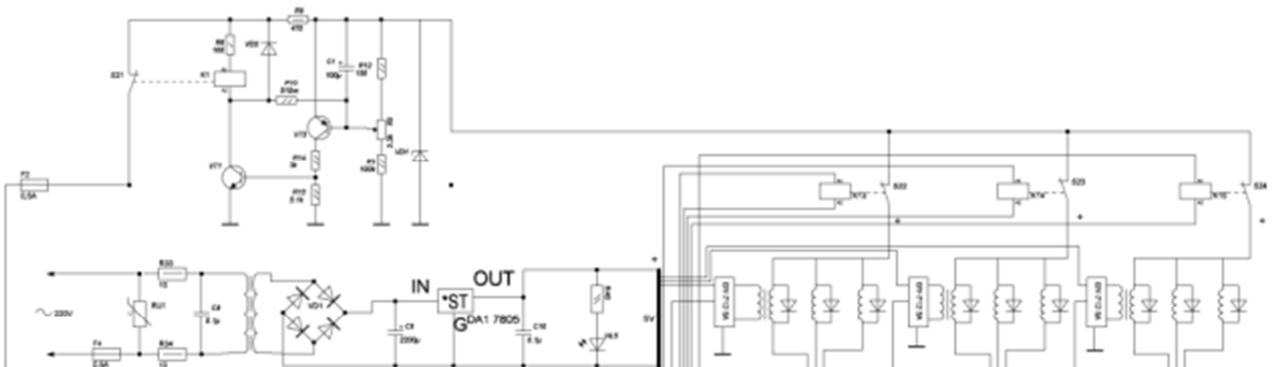


Рисунок А.2 – Принципиальная схема АМА с защитным устройством и блоком питания 5В

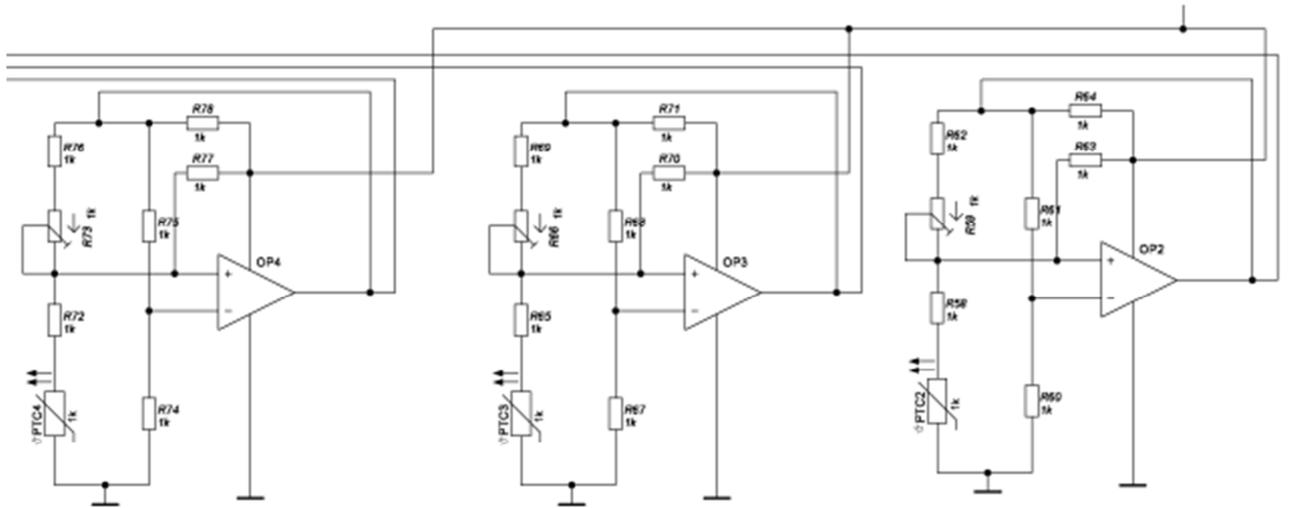


Рисунок А.3 – Принципиальная схема датчиков скорости потока жидкости

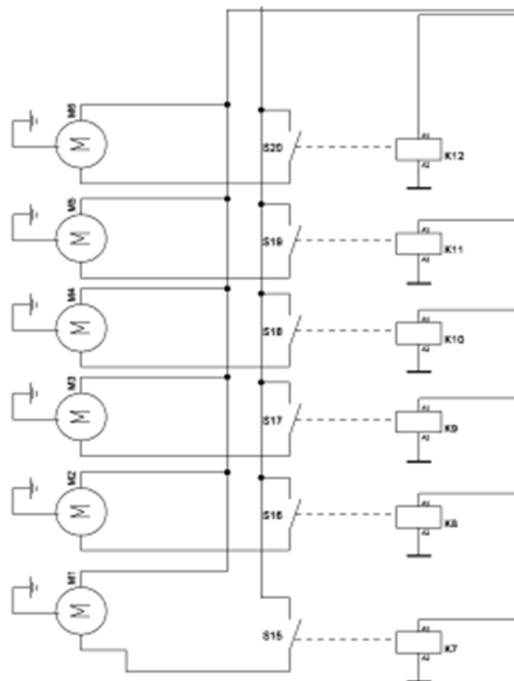


Рисунок А.4 – Принципиальная схема шаровых электроприводов с коммутационными элементами

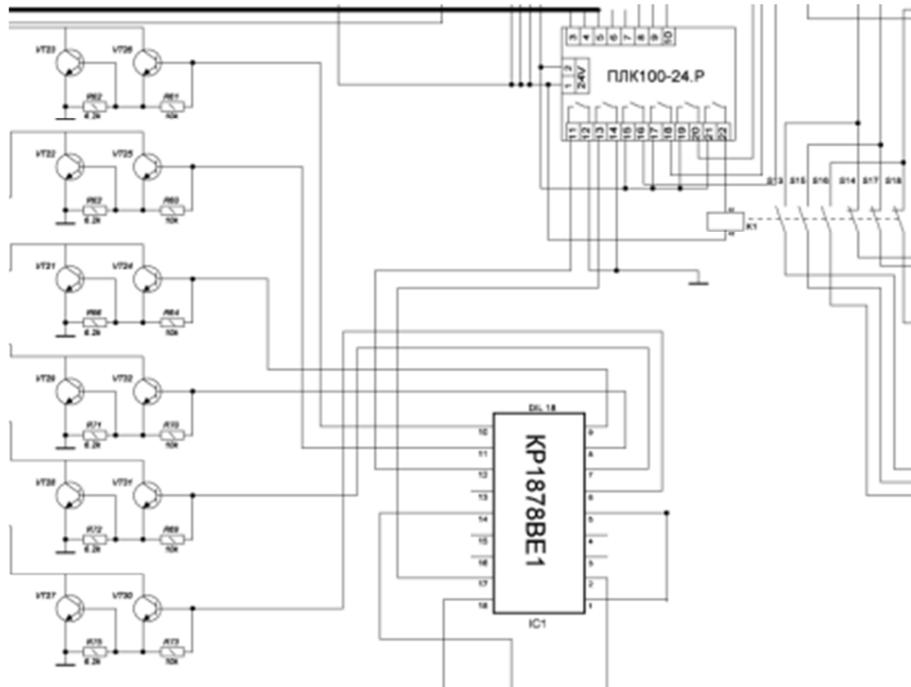


Рисунок А.5 – Микроконтроллер КР1878ВЕ1 с усилительными транзисторами

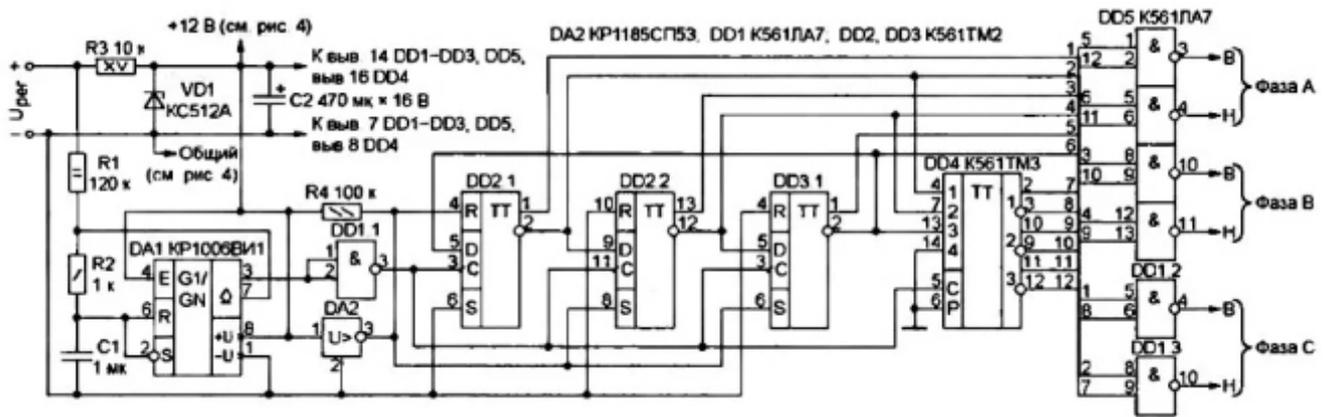


Рисунок А.6 – Принципиальная схема трёхфазного инвертора с широко-импульсной модуляцией

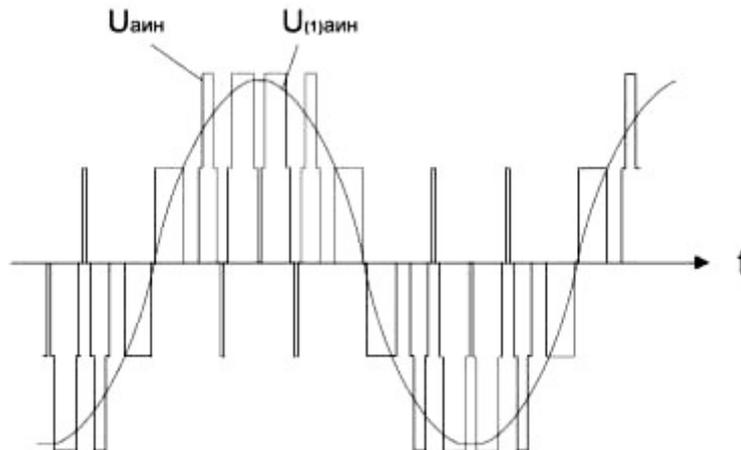


Рисунок А.7 – Форма выходного напряжения одной фазы трехфазного инвертора с ШИМ

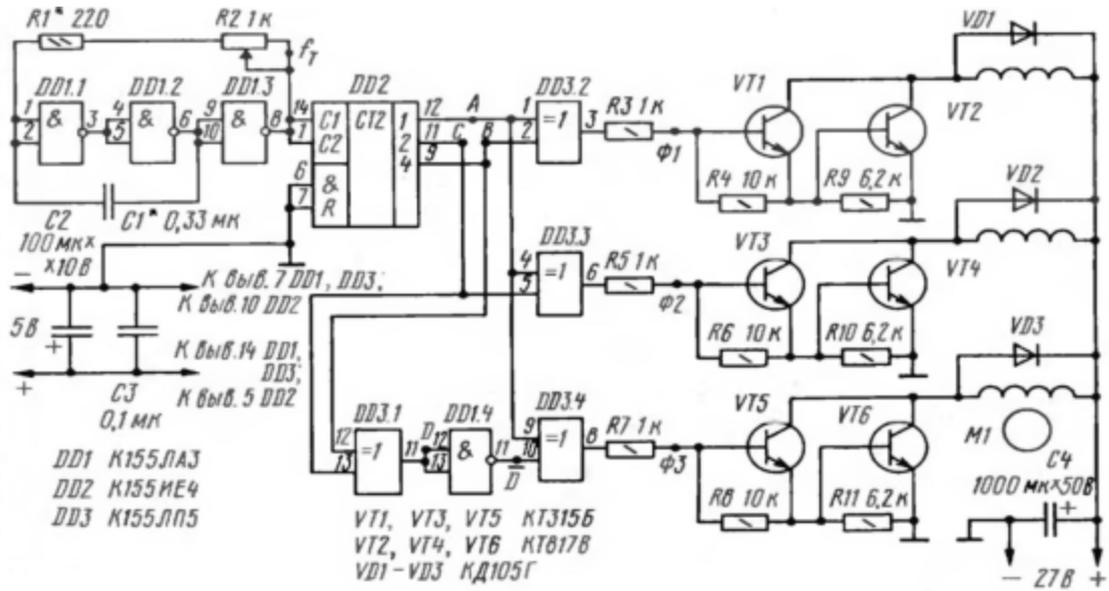


Рисунок А.8 – Принципиальная схема трехфазного генератора

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Переменные, используемые в программе:

```
PROGRAM PLC_PRG
VAR_INPUT
  T:REAL;
  I:BOOL;
  U:REAL;
  Start: BOOL;tzad: REAL;Flow_zad: REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
  OUT_PTG1:BOOL;
  OUT_PTG2:BOOL;
  KRAN: INT;
  faz1: BOOL;
  faz2: BOOL;
  faz3: BOOL;
  ama: BOOL;
END_VAR
VAR
  tem: Reg_T;
  tok: Reg_I;
  faz: BOOL;
  T1: TON;T2: TON;T3: TON;BL1: BLINK;BL2: BLINK;BL3: BLINK;
END_VAR
```

Код программы:

```
LD TRUE
JMPCN en_temp0
CAL tem(T := T, Flow := U, tzad := tzad, Flow_zad := Flow_zad)
LD tem.KRAN
en_temp0:
LD TRUE
JMPCN en_temp1
LD tem.KRAN
MOVE
ST KRAN
en_temp1:
LD TRUE
AND I
ST tok.I
CAL tok
LD tok.Plata2
ST OUT_PTG2
LD tok.Plata1
ST OUT_PTG1
LD Start
ST faz
LD TRUE
AND faz
ST T1.IN
CAL T1(PT := T#0ms)
```

```

LD      TRUE
AND     T1.Q
ST      BL1.ENABLE
CAL     BL1(TIMELOW := T#2000ms, TIMEHIGH := T#2000ms)
LD      BL1.OUT
ST      faz1
LD      TRUE
AND     faz
ST      T2.IN
CAL     T2(PT := T#1000ms)
LD      TRUE
AND     T2.Q
ST      BL2.ENABLE
CAL     BL2(TIMELOW := T#2000ms, TIMEHIGH := T#2000ms)
LD      BL2.OUT
ST      faz2
LD      TRUE
AND     faz
ST      T3.IN
CAL     T3(PT := T#2000ms)
LD      TRUE
AND     T3.Q
ST      BL3.ENABLE
CAL     BL3(TIMELOW := T#2000ms, TIMEHIGH := T#2000ms)
LD      BL3.OUT
ST      faz3
LD      faz1
OR      faz2
OR      faz3
ST      ama

```

Функциональный блок управления платами псевдотрехфазного генератора:

```

FUNCTION_BLOCK Reg_I
VAR_INPUT
    I:BOOL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    Plata1: BOOL;
    Plata2: BOOL;
END_VAR
VAR
END_VAR
IF I=FALSE THEN
    Plata1:=TRUE;
    Plata2:=FALSE;
ELSE
    Plata1:=FALSE;
    Plata2:=TRUE;
END_IF

```

Функциональный блок управления температурой:

```

FUNCTION_BLOCK Reg_T

```

```

VAR_INPUT
  T:REAL;
  Flow: REAL;
  tzad:REAL;
  Flow_zad: REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
  KRAN: INT;
END_VAR
VAR
END_VAR
IF T>=tzad OR Flow>=Flow_zad THEN
  KRAN:=75;
IF T>=tzad AND Flow>=Flow_zad THEN
  KRAN:=50;
END_IF
ELSE
  KRAN:=100;
END_IF

```

Функциональный блок управления заслонками:

```

FUNCTION_BLOCK Reg_U2
VAR_INPUT
  LFRS1:REAL; (*Показания датчика скорости жидкости АМА №1*)
  LFRS2: REAL; (*Показания датчика скорости жидкости АМА №2*)
  LFRS3: REAL; (*Показания датчика скорости жидкости АМА №3*)
  LFRS: REAL; (*Показания датчика скорости жидкости в подающей трубе*)
  S1: INT;    (*Показания датчика угла поворота заслонки №1*)
  S2: INT;    (*Показания датчика угла поворота заслонки №2*)
  S3: INT;    (*Показания датчика угла поворота заслонки №3*)
  S4: INT;    (*Показания датчика угла поворота заслонки №4*)
  S5: INT;    (*Показания датчика угла поворота заслонки №5*)
  S6: INT;    (*Показания датчика угла поворота заслонки №6*)
  S7: INT;    (*Показания датчика угла поворота заслонки подающей трубы*)
  flap: BOOL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
  Q1: BOOL; (*Выход контроллера включающего реле К1 управляющее заслонкой №1*)
  Q2: BOOL;(*Выход контроллера включающего реле К2 управляющее заслонкой №2*)
  Q3: BOOL;(*Выход контроллера включающего реле К3 управляющее заслонкой №3*)
  Q4: BOOL;(*Выход контроллера включающего реле К4 управляющее заслонкой №4*)
  Q5: BOOL;(*Выход контроллера включающего реле К5 управляющее заслонкой №5*)
  Q6: BOOL;(*Выход контроллера включающего реле К6 управляющее заслонкой №6*)
  Q13: BOOL;
  Q14: BOOL;
  Q15: BOOL;
  QFALSE: BOOL;
END_VAR
VAR
  D:REAL; (* Диаметр подающей трубы*)
  D_1: REAL; (*Диаметр трубы на которую установлен АМА*)

```

```
END_VAR  
QFALSE:= FALSE;  
IF flap=TRUE THEN  
S7:= 12;  
END_IF
```

```
CASE S7 OF  
5: D:=0.0017;  
10: D:=0.0034;  
15: D:=0.0051;  
20:D:=0.0068;  
25:D:=0.0085;  
30:D:=0.0102;  
35:D:=0.0119;  
40:D:=0.0136;  
45:D:=0.0153;  
50:D:=0.0017*10;  
55:D:=0.0017*11;  
60:D:=0.0017*12;  
65:D:=0.0017*13;  
70:D:=0.0017*14;  
75:D:=0.0017*15;  
80:D:=0.0017*16;  
85:D:=0.0017*17;  
90:D:=0.0017*18;  
END_CASE;  
CASE S1 OF  
5: D_1:=0.00027;  
10: D_1:=0.00027*2;  
15: D_1:=0.00027*3;  
20:D_1:=0.00027*4;  
25:D_1:=0.00027*5;  
30:D_1:=0.00027*6;  
35:D_1:=0.00027*7;  
40:D_1:=0.00027*8;  
45:D_1:=0.00027*9;  
50:D_1:=0.00027*10;  
55:D_1:=0.00027*11;  
60:D_1:=0.00027*12;  
65:D_1:=0.00027*13;  
70:D_1:=0.00027*14;  
75:D_1:=0.00027*15;  
80:D_1:=0.00027*16;  
85:D_1:=0.00027*17;  
90:D_1:=0.00027*18;  
END_CASE;  
CASE S3 OF  
5: D_1:=0.00027;  
10: D_1:=0.00027*2;  
15: D_1:=0.00027*3;  
20:D_1:=0.00027*4;
```

```

25:D_1:=0.00027*5;
30:D_1:=0.00027*6;
35:D_1:=0.00027*7;
40:D_1:=0.00027*8;
45:D_1:=0.00027*9;
50:D_1:=0.00027*10;
55:D_1:=0.00027*11;
60:D_1:=0.00027*12;
65:D_1:=0.00027*13;
70:D_1:=0.00027*14;
75:D_1:=0.00027*15;
80:D_1:=0.00027*16;
85:D_1:=0.00027*17;
90:D_1:=0.00027*18;
END_CASE;
CASE S5 OF
5: D_1:=0.00027;
10: D_1:=0.00027*2;
15: D_1:=0.00027*3;
20:D_1:=0.00027*4;
25:D_1:=0.00027*5;
30:D_1:=0.00027*6;
35:D_1:=0.00027*7;
40:D_1:=0.00027*8;
45:D_1:=0.00027*9;
50:D_1:=0.00027*10;
55:D_1:=0.00027*11;
60:D_1:=0.00027*12;
65:D_1:=0.00027*13;
70:D_1:=0.00027*14;
75:D_1:=0.00027*15;
80:D_1:=0.00027*16;
85:D_1:=0.00027*17;
90:D_1:=0.00027*18;
END_CASE;
(*LFRS:= 3;
LFRS1:= (LFRS* 3.14*D *D /4) / (3.14*D_1*D_1 / 4) ;
LFRS2:= (LFRS* 3.14*D *D /4) / (3.14*D_1*D_1 / 4) ;
LFRS3:= (LFRS* 3.14*D *D /4) / (3.14*D_1*D_1 / 4) ;*)
IF LFRS1 > 12 THEN
Q13:=TRUE;
ELSE
Q13:=FALSE;
END_IF
IF LFRS2> 12 THEN
Q14:= TRUE;
ELSE
Q14:=FALSE;
END_IF
IF LFRS3> 12 THEN
Q15 :=TRUE;

```

```
ELSE
Q15:=FALSE;
END_IF
IF S1 >= 5 THEN
S2:= 85;
Q1:= TRUE;
Q2 := TRUE;
ELSE
Q1:=FALSE;
Q2:=FALSE;
END_IF
IF S3>= 5 THEN
S4:=85;
Q3:= TRUE;
Q4 := TRUE;
ELSE
Q3:=FALSE;
Q4:=FALSE;
END_IF
IF S5>= 5 THEN
S6:= 85;
Q5:= TRUE;
Q6 := TRUE;
ELSE
Q5:=FALSE;
Q6:=FALSE;
END_IF
```


ПРИЛОЖЕНИЕ В



Рисунок В.1 – Внешний вид акусто-магнитных аппаратов, установленных в систему отопления на гидротермальных источниках



Рисунок В.2 – Общий вид системы автоматики



Рисунок В.3 – Общий вид системы акусто-магнитной обработки жидкости



Рисунок В.4 – Изображение акусто-магнитного аппарата, установленного на трубе гидротермального источника



Рисунок В.5 – Изображение разрез трубы до установки аппарата



Рисунок В.6 – Изображение состояния заслонки после установки аппарата

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г.1 Диаметры обмоточного провода и коэффициенты заполнения обмотки по меди

Диаметр провода без изоляции d , мм	Коэффициент заполнения провода ПЭВ-1 $K_{зМ}$	Коэффициент заполнения провода ПЭВ-2 $K_{зМ}$
0,050	0,280	0,250
0,063	0,330	0,290
0,071	0,380	0,340
0,080	0,430	0,380
0,090	0,460	0,410
0,100	0,490	0,440
0,112	0,510	0,460
0,125	0,520	0,480
0,140	0,535	0,495
0,160	0,550	0,510
0,180	0,568	0,527
0,200	0,580	0,538
0,224	0,594	0,550
0,250	0,605	0,560
0,280	0,616	0,572
0,315	0,627	0,580
0,355	0,637	0,589
0,400	0,647	0,597
0,450	0,656	0,605
0,500	0,663	0,612
0,560	0,668	0,618
0,630	0,674	0,625
0,710	0,679	0,631
0,750	0,680	0,634
0,800	0,682	0,637
0,850	0,684	0,640
0,900	0,685	0,643
0,950	0,686	0,646
1,000	0,687	0,648
1,060	0,688	0,650
1,120	0,689	0,651
1,180	0,690	0,652

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

ЦИЛ ФГУП «КАВКАЗГЕОЛСЪЕМКА»				ПРОТОКОЛ								
Аттестат аккредитации РОСС RU.0001.510717				АНАЛИЗА								
Химик <u>Салфеевич Р.В.</u>												
Дата анализа <u>18.01.09.</u>												
Ст. инженер-контролер <u>Салфеевич</u>												
№ п.	№ пробы лабор.	№ пробы автор.	Едини. измерения	КАТИОНЫ								Сумма катионов
				Na	K	Na+K	Ca	Mg	Mn	Fe ²⁺	Fe ³⁺	
			МГ-дм ³	Мал соленое								не
			МГ-экв									
			%									
10	1219	1Т	МГ-дм ³			3107,8	441	49	8,8	необн		3165,6
			МГ-экв			195,12	2,20	0,40	0,49			198,21
			%			92,7	1,6	0,3	0,4			100
11	1220	2Т	МГ-дм ³			1926,3	210	1,2	4,4	необн		1951,9
			МГ-экв			83,71	1,05	0,10	0,24			85,10
			%			92,4	1,2	0,1	0,3			100
12	1221	4Т	МГ-дм ³			1504,2	240	1,2	3,0	необн		1532,4
			МГ-экв			65,40	1,30	0,10	0,14			66,84
			%			92,8	1,8	0,1	0,3			100
13	1222	9Т	МГ-дм ³			1253,9	160	1,2	3,2	необн		1274,3
			МГ-экв			71,52	0,80	0,10	0,18			55,60
			%			92,1	1,4	0,2	0,3			100
14	1223	10Т	МГ-дм ³			2200,9	160	2,4	4,2	необн		2264,1
			МГ-экв			91,46	0,80	0,20	0,27			98,73
			%			92,7	0,8	0,2	0,3			100
15	1224	11Т	МГ-дм ³			2116,3	521	4,9	5,6	необн		2778,9
			МГ-экв			113,10	2,60	0,40	0,31			121,41
			%			92,3	2,7	0,3	0,3			100
16	1225	14Т	МГ-дм ³			1835,6	240	1,2	4,0	необн		1864,8
			МГ-экв			79,81	1,20	0,10	0,22			81,33
			%			92,1	1,5	0,1	0,3			100
17	1226	15Т	МГ-дм ³			1338,1	170	1,2	4,4	необн		1361,0
			МГ-экв			58,19	0,80	0,10	0,24			59,33
			%			92,0	1,4	0,2	0,4			100
			МГ-дм ³	Сильное								не
			МГ-экв									
			%									
18	1227	4Т	МГ-дм ³			760,6	6,0	не	обн			766,6
			МГ-экв			33,04	0,30					33,34
			%			92,7	0,9					100
19	1228	5Т	МГ-дм ³			531,2	8,0	не	обн			539,2
			МГ-экв			25,24	0,40					25,64
			%			92,4	1,6					100
			МГ-дм ³	Местное								не
			МГ-экв									
			%									
20	1229	2Т	МГ-дм ³			922,2	10,0	не	обн	1,8	необн	964,0
			МГ-экв			41,40	0,50		0,10			42,00
			%			92,6	1,2		0,2			100

Рисунок Д.1 – Протокол химического анализа воды (часть 1)

83 от 20.03.09

ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ

Заказчик ОАО СХЗК, Нартогаган
 Экспедиция _____
 Партня _____
 Отряд _____
 Участок _____
 Заказ № 7/н от 19.12.08

АНИОНЫ						Недиссоц. соединений, МГ-дм³		Сумма минер. вещества МГ-дм³	Сухой остаток МГ-дм³		Окисляемость МГ-О₂-дм³	PH	СО₂		Жесток.
HCO₃	Cl	SO₄	NO₃	NO₂	Сумма анионов	H₂SiO₄	Fe(OH)₃		вычисл. липиды	эксперимент.			млрсс. МГ-дм³	своб. г-дм³		общая
<i>Сотрөгүмүллө</i>															
12814	38992	3463	н.с.	об.ч.	35274	72,2	0,6	8766,7	81260	82960	1,5	7,4			
2100	1100	221			13821										2,60
15,2	79,6	5,2			100										
12053	20272	208	н.с.	об.ч.	36184	635	н/д	5668,4	50159	50839	1,8	8,0			1,15
2140	5700	6,70			8570										
251	630	7,9			100										
15373	16308	1860	н.с.	об.ч.	22841	708	0,4	41157,7	39331	40110	3,8	7,2			1,30
1700	4000	3,74			66,87										
254	688	5,8			100										
1145	1223	2304	н.с.	об.ч.	2532,2	637	0,4	3866,6	32809	33110	4,3	7,9			0,30
1920	3160	480			5860										
345	569	8,6			100										
13058	24817	3522	н.с.	об.ч.	41397	639	0,4	64441	58212	58320	5,4	7,0			1,00
2140	н.с.	7,33			8813										
217	709	7,4			100										
10800	25098	2263	н.с.	об.ч.	48161	730	0,6	7668,6	7286	73224	6,0	7,4			3,00
1740	9900	471			12141										
146	815	3,9			100										
13180	15019	2818	н.с.	об.ч.	35102	679	н/д	5442,9	41839	48200	3,4	7,4			1,30
216	5380	5,93			8133										
266	661	7,3			100										
12570	11341	2584	н.с.	об.ч.	26995	645	1,0	4126,0	34475	35800	2,1	7,9			0,35
2060	3340	5,33			5938										
347	562	9,1			100										
<i>Сотрөгүмүллө</i>															
10373	3570	2304	4,5	н/д	1647,2	54,3	0,4	2444,5	19789	21080	1,3	8,3			0,30
1700	990	480	0,07		3337										
509	297	14,4	0,2		100										
5186	3345	3465	1,8	1,5	1216,9	631	0,4	1869,6	1613,3	16200	1,0	7,7			0,40
840	1090	7,11	0,03	0,03	2567										
327	390	3,1	0,1	0,1	100										
<i>Сотрөгүмүллө</i>															
15341	4600	2191	н.с.	об.ч.	21006	736	н/д	3163,2	2415,9	25220	1,0	8,3			0,50
2220	1300	560			4280										
228	310	1,3			100										

Рисунок Д.2 – Протокол химического анализа воды (часть 2)

№	Наименование месторождения	Количество скважин, шт.		Глубина скважин, м	Дебиты скважин, м ³ /сут.	Температура на устье скважины, °С	Минерализация общая, г/л	Утверждённые запасы, м ³ /сут.	Примечание
		всего	в экспл.						
1	Мостовское	17	13	1650–1850	2000–2500	67–75	0,9–1,9	11100	Эксплуатируется
2	Ново-Ярославское	5	2	2530–2676	485–1000	86–89	2,4–4,3	–	То же
3	Ульяновское	4	2	1700–1900	2000	75	2	1900	То же
4	Вознесенское	9	4	1900–2650	1260–1685	100–112	0,8–2,8	7250	То же
5	Южно-Вознесенское	6	3	1900–2650	900–2000	100–112	0,8–2,8	–	То же
6	Северо-Ереминское	2	1	2827–2958	830–2108	107–117	1,3–2,9	2400	То же
7	Грязнореченское	1	1	2865	1500	107	3,1	–	То же
8	Майкопское	12	9	1330–1770	500–1500	82–86	3,2–8,9	4980	То же
9	Отраденское	4	2	1920–2040	750–1080	72–76	1,5–3,6	1864	То же
10	Приурупское	2	1	1940	2250	99–103	1,5–1,7	1700	То же
11	Попутенское (Воскресенское)	4	1	–	1500–2200	115	1,5–3,5	–	То же
12	Дагестано-Курджипское	3	1	2100–2300	600–1100	81	0,9	–	То же
13	Южно-Советское	3	1	2810	2890	116	1,4	2200	То же
14	Лабинское	4	–	2450–2520	2550–3770	99–103	13–15	–	Простаивает
15	Ходзевское	2	–	2450	1400	86	2,3	–	То же
16	Межчохранское	2	–	2000	800	86	2,9	–	То же
17	Харьковское	1	–	2700	–	98	1,6	500	То же
18	Родниковское	2	–	2800–2950	–	74	–	1000	То же

Рисунок Д.3 – Ресурсная база геотермальных месторождений Краснодарского края и Республики Адыгея

Таблица Д.1 Противонакипный эффект (ПЭ) при обработке воды акусто-магнитным аппаратом

Питьевая вода по различным городам	ПЭ %	рН	Щёлочность мг-экв/л	Плотный остаток мг/л	Fe мг/л	Общая жёсткость мг-экв/л	Ca мг-экв/л	Mg мг-экв/л	Окисляемость по кислороду мг-экв/л
Новочеркасск	91,0	7,92	3,4	668	1,20	6,70	67,00	29	3,46
Пермь	91,5	7,60	2,1	548	0,72	7,42	2,00	0,03	3,54
Москва	92,0	7,30	2,0	170	0,18	2,90	1,80	0,70	6,10
Брянск	95,0	6,97	–	200	0,10	6,30	0,35	0,09	1
Майкоп	93,5	7,59	–	358	0,42	5,62	1,40	0,08	0,25

Опытная проверка применения акусто-магнитного аппарата проводилась на питьевой воде с различным солесодержанием в различных областях России. В таблице Д1 представлен результирующий противонакипный эффект наблюдаемый после обработки воды акусто-магнитным аппаратом. Для получения схожего эффекта посредством обработки воды магнитными аппаратами необходимо создать напряженность магнитного поля порядка $(9,5 - 22)10^4$ А/м.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Таблица Е.1 – Зависимость величины рН раствора от времени и числа обработки

Время измерения	TDS	T°C	pH
Априори	938	18	5
1 перегон	937	18	5,5
2 перегон	936	18	6
15 мин	935	18	5,5
20 мин	935	18	6
35 мин	934	18	6
120 мин	887	18	6,5
180 мин	885	18	5
24 часа	872	18	6,9

Наружный диаметр, мм	PN10		PN20		PN30	
	Внутренний диаметр	Толщина стенки	Внутренний диаметр	Толщина стенки	Внутренний диаметр	Толщина стенки
16			10.6	2.7		
20	16.2	1.9	13.2	3.4	13.2	3.4
25	20.4	2.3	16.6	4.2	16.6	4.2
32	26.0	3.0	21.2	5.4	21.2	3.0
40	32.6	3.7	26.6	6.7	26.6	3.7
50	40.8	4.6	33.2	8.4	33.2	4.6
63	51.4	5.8	42	10.5	42	5.8
75	61.2	6.9	50	12.5	50	6.9
90	73.6	8.2	6	15		
110	90	10	73.2	18.4		

Рисунок Е.1 – Классификация диаметров полипропиленовых труб

Параметр	Модель аппарата			
	АМО-25УХЛ	АМО-100УХЛ	АМО-200УХЛ	АМО-600УХЛ
Напряжение, В	220			
Частота сети, Гц	60			
Производительность по обрабатываемой воде м ³ /ч	25	100	200	600
Напряженность магнитного поля, кА/м	200			
Температура обрабатываемой воды, °С	60	40	50	70
Рабочее давление воды, МПа	1,6			
Потребляемая электромагнитом мощность, кВт	0,35	0,5	0,5	1,8
Габаритные размеры электромагнита, мм	260x410	440x835	520x950	755x1100
Габаритные размеры блока питания, мм	250x350x250			
Масса электромагнита, кг	40	200	330	1000
Масса блока питания, кг	8,0			

Рисунок Е.2 – Технические характеристики отечественных аппаратов магнитной обработки воды типа АМО ТУ 34-38-10733-84 на электромагнитах. Завод-изготовитель: ОАО «Энергозапчасть», г. Чебоксары

Показатели	Тип аппарата								Аппарат высокой производительности
	П-02	П-06	П-08	П-10	П-16	П-30	П-50	П-100	
Производительность, м ³ /ч	2	6	8	10	16	30	50	100	14 400
Общая длина, мм	684	822	860	969	905	910	1 200	1 480	—
Наружный диаметр, мм	76	108	108	121	133	219	325	377	—
Количество намагничивающих катушек, шт.	6	6	6	6	6	6	6	6	44
Число ампер-витков катушки	1 260	1 800	2 300	2 800	3 100	3 650	4 200	6 920	15 338
Расчетный рабочий ток в катушке, а	1,5	2,0	1,0	1,8	1,8	0,9	2,0	3,0	14
Напряженность магнитного поля, 10 ⁻⁶ а/м	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Общая длина пути воды в зонах воздействия магнитного поля, мм	300	312	348	348	300	336	348	300	—
Расчетная потребляемая мощность, вт	63— 79	88— 109	125— 142	144— 180	180— 240	254— 330	300— 400	500— 660	42 700
Удельная потребляемая мощность, вт/м ³	31,5— 39,5	15— 18	15— 18	14— 18	11— 15	8—11	6—8	5—7	3

Рисунок Е.3 – Параметры аппаратов для магнитной обработки воды Харьковского инженерно-экономического института

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. ДОКУМЕНТЫ ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
ВНЕДРЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.1

МИНИСТЕРСТВО
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РЕСПУБЛИКИ АДЫГЕЯ

385000, г. Майкоп,
ул. Гагарина, 20
тел. 52-56-53, факс 52-56-53
e-mail: info@mcs-ra.ru



АДЫГЭ РЕСПУБЛИКЭМ
МЭКЪУМЭЩЫМКІЭ
И МИНИСТЕРСТВ

385000, кы. Мыекъуапэ,
Гагаринэм нур., 20
тел. 52-56-53, факс 52-56-53
e-mail: info@mcs-ra.ru

№ 2756

«14» 08. 2018 г.

Министерство сельского хозяйства Республики Адыгея подтверждает научно практическую значимость полученных результатов исследований по теме «Параметры акусто-магнитной электротехнологии с низкими эксплуатационными затратами в гидропонных установках защищенного грунта», проводимых кандидатом технических наук, доцентом Коржаковым А.В. в агропромышленных хозяйствах Республики Адыгея (ЗАО «Радуга»). Внедрение акусто-магнитных аппаратов показало высокую экономическую эффективность применения в системах теплоснабжения на геотермальных источниках, а так же в системах гидропонного выращивания растений.

Основываясь на результатах проделанной научно-исследовательской работы и показателях экспериментальной проверки, Министерство рекомендует данные акусто-магнитные аппараты для широкого внедрения на предприятиях агропромышленного комплекса Республики Адыгея совместно с уже существующими технологиями водоподготовки.

Министр

Ю.Н. Петров

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.2

УТВЕРЖДАЮ:

Министр топливно-энергетического
 комплекса и жилищно-коммунального
 хозяйства Краснодарского края
 22.09.2020 А.А. Трембицкий



АКТ

**передачи технического предложения в виде рекомендаций
 по установке и эксплуатации акусто-магнитных
 аппаратов на теплотехническом оборудовании**

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт в том, что разработанное в ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ техническое предложение в виде рекомендаций по установке и эксплуатации акусто-магнитных аппаратов на теплотехническом оборудовании общим объемом 62 страницы, содержащее краткое изложение проблемы образования накипи на трубопроводных системах особенно при использовании геотермальных источников, описание предлагаемой технологии, схмотехнические решения схемы управления с элементами автоматики, формы и параметры аппаратов на безвозмездной основе переданы в министерство для использования предприятиями ТЭК и ЖКХ Краснодарского края.

Система водоподготовки посредством акусто-магнитной технологии создает в трубопроводах вращающееся акустическое и магнитное поле. Акусто-магнитный аппарат, закреплённый поверх её стенок, передаёт трубе акустический сигнал посредством ферритового кольца. Предлагаемая технология может использоваться при непостоянной скорости потока воды, имеет дальность действия до двух километров, действенна в условиях непостоянного химического состава воды, подавляет процесс биообрастания. В результате применения акусто-магнитной технологии значительно снижаются издержки на техобслуживание, увеличивается срок службы оборудования.

Научный консультант,
 д.т.н., профессор КубГАУ
 Разработчик, докторант

С.В. Оськин
 А.В. Коржаков

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.3

УТВЕРЖДАЮ

первый проректор ФГБОУ ВО
«Кубанский ГАУ», профессор
С.М. Резниченко

16.11.2020



А К Т

об использовании результатов докторской диссертационной работы
соискателя Коржакова Алексея Валерьевича в учебном процессе
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет»
на факультете энергетики

Комиссия в составе:

председателя – декана факультета энергетики и электрификации
к.т.н., доцента Шевченко А.А.;

членов комиссии: заведующего кафедрой «Электрические машины и
электропривод», д.т.н., профессора Оськина С. В.; профессора кафедры
«Электрические машины и электропривод», д.т.н., профессора Стрижкова
И.Г. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной ра-
боты «Режимные параметры акусто-магнитной электротехнологии сниже-
ния солеотложений в геотермальных гидропонных установках защищенно-
го грунта», представленной на соискание ученой степени доктора техниче-
ских наук, использованы в учебном процессе на факультете энергетики.

Комиссия установила, что материалы диссертационной работы соис-
кателя Коржакова А.Е. использованы при изучении дисциплин «Основы
электротехнологии», «Электротехнологические установки» на кафедре
электрических машин и электропривода при рассмотрении перспектив
внедрения новых электротехнологий на предприятиях сельскохозяйствен-
ного производства.

Комиссия считает, что материалы диссертации, рассматриваемые
при изучении дисциплин «Основы электротехнологии» и «Электротехно-
логические установки» соответствуют требованиям образовательных стан-
дартов по направлениям подготовки 35.03.04 и 35.06.04.

Председатель комиссии  А.А. Шевченко

Члены комиссии  С.В. Оськин

 И. Г. Стрижков

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.4



АКТ

о внедрении (использовании) акусто-магнитного аппарата
 Коржакова Алексея Валерьевича в системе теплоснабжения
 тепличного комплекса ЗАО «Радуга» (город Майкоп)

Комиссия в составе: председатель Х.Н. Джаримок; члены комиссии Костыркин А.А., Зызин М.И., Коржаков А.В., составили настоящий акт о том, что акусто-магнитный аппарат Коржакова А.В., был установлен в систему теплоснабжения, где носителем тепла является геотермальная вода с повышенным содержанием солей. В течение всего отопительного сезона внеплановых остановок не было. После отопительного сезона были проведены плановые работы. В результате было установлено, что на трубах имеется небольшой слой накипи (менее миллиметра). Так как в предыдущий отопительный сезон трубы были забиты отложениями солей полностью и подлежали замене, то можно говорить о высокой эффективности акусто-магнитного аппарата.

Председатель комиссии: _____

Члены комиссии:
 Главный инженер: _____
 Инженер теплотехник: _____
 Инженер по инновационным технологиям: _____

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.5

«Утверждаю»
 Директор
 ЗАО «Радуга»
 Х.Н. Джаримок
 «23» август 2018г.

АКТ

о внедрении (использовании) акусто-магнитного аппарата
 Коржакова Алексея Валерьевича в отопительные и гидропонные системы
 тепличного комплекса ЗАО «Радуга» (город Майкоп)

Комиссия в составе: председатель Х.Н. Джаримок; члены комиссии Костыркин А.А., Зылин М.И., Коржаков А.В., составили настоящий акт о том, что акусто-магнитный аппарат Коржакова А.В., был установлен в систему теплоснабжения, где носителем тепла является геотермальная вода с повышенным содержанием солей. В течение двух отопительных сезонов внеплановых остановок оборудования не было. После отопительного сезона проводились плановые работы. До установки аппаратов после отопительного сезона трубы были забиты отложениями солей полностью и подлежали замене. После двух сезонов использования акусто-магнитных аппаратов в системах теплоснабжения было установлено, что на трубах отсутствует накипь. Это свидетельствует о высокой эффективности акусто-магнитного аппарата в системе теплоснабжения теплиц. Также проводился хозяйственный эксперимент по обработке гидропонного раствора, питающего тепличные растения. Результаты эксперимента показывают, что урожайность растений, к которым подается обработанный гидропонный раствор, выше, чем у других растений.



Председатель комиссии: _____

Члены комиссии:

Главный инженер: _____

Инженер теплотехник: _____

Инженер по инновационным
 технологиям: _____

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.6

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

«АДЫГЕЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «АГУ»)

АДРЕС: 385000, Республика Адыгея, г. Майкоп, ул. Первомайская, 208. Тел/факс: 8(8772) 57-02-73. E-mail: adu@adyguet.ru



Урысье ФедерациемкI шIныгIэмрI
апшIэрI гIэсIныгIэмрI и Министерств

федерациемкI бюджетым тетIу апшIэрI
гIэсIныгIэ зIшIарIэгI-отырI гIэсIныгIэет
кIэрIалыгIо IофтIапIуу

«АДЫГЭ КЪЭРАЛЫГЪО
УНИВЕРСИТЕТ»
(ФБАГЪ ЗГЪКЪ «АКЪУ»)

17.09.2019 № 1590
На № _____ от _____

В Диссертационный совет Д 220.038.08
350044, Россия, г. Краснодар, ул. Калинина, 13

Справка о внедрении

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования А.В. Коржакова «Параметры акусто-магнитной электротехнологии снижения солейотложений в гидропонных установках защищенного грунта» обладает актуальностью, представляет практический интерес и были внедрены в учебный процесс инженерно-физического факультета на кафедре автоматизированных систем обработки информации и управления.

Заведующий кафедрой АСОИУ

В.Р.И.О. проректора по
научной работе

к.т.н., доцент П.Ю. Бучацкий

к.б.н., доцент М.Н. Силантьев



ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ПАТЕНТЫ И АВТОРСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2654334

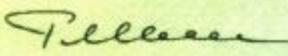
Способ обработки гидропонного питательного раствора

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина" (RU)*

Авторы: *Коржаков Алексей Валерьевич (RU), Оськин Сергей Владимирович (RU), Коржаков Валерий Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2017101051
Приоритет изобретения 11 января 2017 г.
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 17 мая 2018 г.
Срок действия исключительного права на изобретение истекает 11 января 2037 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



16-06-2018

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2646091

Устройство для обработки гидропонного питательного раствора

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина" (RU)*

Авторы: *Коржаков Алексей Валерьевич (RU), Оськин Сергей Владимирович (RU), Коржаков Валерий Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2017101049

Приоритет изобретения 11 января 2017 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 01 марта 2018 г.

Срок действия исключительного права на изобретение истекает 11 января 2037 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



13-20

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2641822

Способ безреагентной обработки воды

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина" (RU)*

Авторы: *Коржаков Алексей Валерьевич (RU), Оськин Сергей Владимирович (RU), Коржаков Валерий Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2017100213
 Приоритет изобретения 09 января 2017 г.
 Дата государственной регистрации в
 Государственном реестре изобретений
 Российской Федерации 22 января 2018 г.
 Срок действия исключительного права
 на изобретение истекает 09 января 2037 г.

Руководитель Федеральной службы
 по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2641137

Устройство для безреагентной обработки воды

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина" (RU)*

Авторы: *Коржаков Алексей Валерьевич (RU), Оськин Сергей Владимирович (RU), Коржаков Валерий Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2017100210

Приоритет изобретения 09 января 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 16 января 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 09 января 2037 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2635591

**Устройство для защиты от образования отложений на
поверхностях трубопроводов систем теплоснабжения**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Кубанский государственный аграрный университет имени
И.Т. Трубилина" (RU)*

Авторы: *Коржаков Алексей Валерьевич (RU), Оськин Сергей
Владимирович (RU), Коржаков Валерий Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2017100470

Приоритет изобретения 09 января 2017 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 14 ноября 2017 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 09 января 2037 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



28-11-2017



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК
 ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ
 ПРИ ГОСУДАРСТВЕННОМ КОМИТЕТЕ СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ
 (ГОСКОМИЗОБРЕТЕНИЙ)

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 1514726

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Госкомизобретений выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:

"Устройство для безреагентной обработки жидкости"

Автор (авторы): Коржаков Валерий Евгеньевич, Плешаков Вячеслав Васильевич, Крамаренко Борис Дмитриевич и Коржаков Алексей Валерьевич

Заявитель:

Заявка №

4262480

Приоритет изобретения

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР

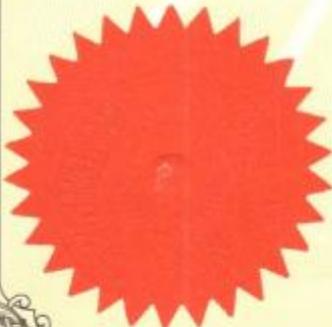
16 июня 1987г.

Действие авторского свидетельства распространяется на всю территорию Союза ССР.

15 июня 1989г.

Председатель Комитета

Начальник отдела





СОЮЗ СОВЕТСКИХ
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ
РЕСПУБЛИК

(19) SU (11) 1514726 A1

(51)4 С 02 F 1/48

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ
ПРИ ГИИТ СССР

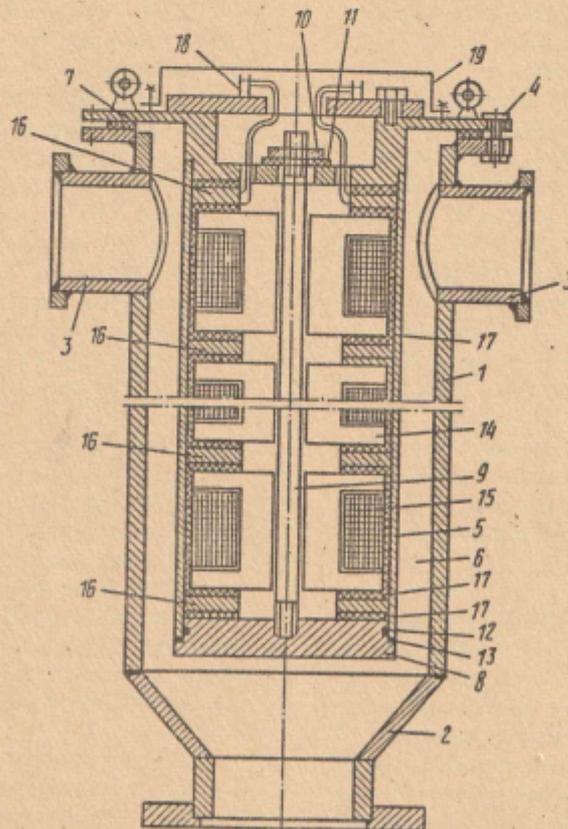
ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

1
(21) 4262480/23-26
(22) 16.06.87
(46) 15.10.89. Бюл. № 38
(72) В.Е.Коржаков, В.В.Плешаков,
Б.Д.Крамаренко и А.В.Коржаков
(53) 621.187.127(088,8)
(56) Авторское свидетельство СССР
№ 945081, кл. С 02 F 1/48, 1981.

2
(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ БЕЗРЕАГЕНТНОЙ
ОБРАБОТКИ ЖИДКОСТИ

(57) Изобретение относится к промышленной обработке воды, может быть использовано в теплоэнергетике, химической, пищевой и других отраслях промышленности для предотвращения на-



(19) SU (11) 1514726 A1